

In article modeling of process of superficial plasma training of a working zone of a penetrative punch with definition of the optimum modes of this process providing high superficial durability with preservation of structure of its internal area is considered.

УДК 621.794.61:539.23

Онысько С.Р., Хвусевич В.М., Чекан Н.М., Акула И.П., Василевич И.Б.

НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Введение. В современном машиностроении одним из приоритетов является создание ресурсо- и энергосберегающих технологий, поиск материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В этой связи важная роль отводится разработке упрочняющих покрытий нового поколения, в частности покрытий из нитридов, карбидов и оксидов тугоплавких металлов, осаждаемых вакуумно-дуговым методом. Наибольшее распространение, благодаря простоте и дешевизне нанесения, получили покрытия нитрида титана. Однако в последнее время постоянное повышение производительности труда требует появления обрабатывающего инструмента, который может работать более длительное время без замены при повышенных нагрузках и температурах. В настоящее время большое внимание сосредоточено на разработке покрытий, обладающих помимо высокой твердости, также высокой ударной вязкостью, которая определяет способность материала сопротивляться трещинообразованию, хорошими трибологическими свойствами, термо- и коррозионной стойкостью. Такие покрытия в силу своего строения называются наноструктурированными и нанокристаллическими и обычно состоят из двух фаз: нанокристаллической и аморфной фазы, или из двух различных нанокристаллических фаз. Такие наноконпозиционные покрытия представляют собой новый класс материалов, у которых механические и трибологические свойства не определяются смесью объемов материалов, но зависят от эффектов на границах зерен. Известно, что механические свойства твердого тела сильно зависят от плотности дислокаций, отношения границы раздела к объему зерна. Улучшение демпфирующей способности наноконпозиционных материалов связывают с зернограницным проскальзыванием, или с механизмом диссипации энергии локализованной на границе раздела зерен. Уменьшение размера зерна существенно влияет на пластичность и твердость материала.

Формирование и исследование покрытий. Для осаждения покрытий ZrCN-DLC использовалась вакуумная установка УВНИПА-1-001, оснащенная катодно-дуговыми источниками плазмы, а также ионным источником. Откачка вакуумной камеры производилась до остаточного давления $\sim 4,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Непосредственно перед осаждением покрытий проводилась ионная очистка подложек путем бомбардировки их поверхности ионами аргона с энергией до 2 кэВ в течение 30 минут. Для нанесения покрытий использовался стационарный дуговой источник плазмы с катодом из Zr (99,9%). Толщина сформированных покрытий составляла около 2–3 мкм. Варьируемым параметром выступало давление реакционного углеводородного газа (C_2H_2). Параметры осаждения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры процесса осаждения покрытий ZrCN-DLC

№ процесса	Ток дуги, А	$P(N_2)$, Па	$U_{смещен.}$, В	$P(C_2H_2)$, Па
1	90	$1,8 \cdot 10^{-2}$	-50	$0,75 \cdot 10^{-2}$
2				$1,5 \cdot 10^{-2}$
3				$1,8 \cdot 10^{-2}$

Для исследования фазового состава покрытий использовалась

рентгеновская дифракция (дифрактометр Дрон-3, длина волны рентгеновского излучения 0,15405 нм ($K\alpha_1$ излучение меди)). Элементный состав и типы химических связей композиционных покрытий ZrCN-DLC определялись с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе ЭС-2401 с длиной волны рентгеновского излучения 0,995 нм ($MgK\alpha$, 1253,6 эВ). Твердость покрытий определялась методом индентирования на микротвердометре ПМТ-3, оснащенном алмазной пирамидой Кнупа, при нагрузке 0,5 Н. Исследования коэффициента трения сформированных наноконпозиционных проводились на трибологическом стенде, работающем по схеме «палец-диск». В качестве контр-тела использовался шарик $\varnothing 5,15$ мм из стали ШХ15 при нагрузке 1 Н. Для подложек из инструментальной стали Х12М герцианское давление составляло 705 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1 приведена рентгенограмма для образца покрытия ZrCN-DLC, полученного при частоте 1 Гц следования разрядных импульсов источника углеродной плазмы. На рентгенограмме присутствуют характерные для нитридных и карбидных фаз циркония рефлексы от плоскостей (111), (200), (220), (222) и (311), а также ряд рефлексов от основы (алюминий). Для всех исследованных образцов наблюдается наиболее высокая интенсивность рефлексов (111) и значительное уширение дифракционных линий. Высокая интенсивность указанного рефлекса свидетельствует о предпочтительном расположении кристаллитов, при котором плоскости (111) параллельны поверхности подложки. Ориентирующее влияние подложки объясняется большой величиной межфазной энергии для плотноупакованных плоскостей (111) ГЦК структуры нитридов и карбидов циркония [1]. Рефлексы (200), (220), (222) и (311) имеют значительно меньшую интенсивность.

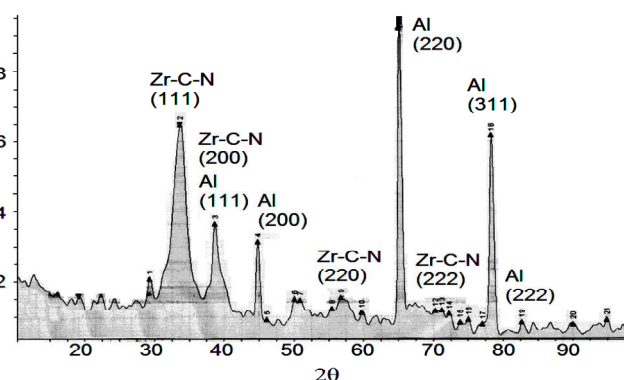


Рис. 1. Рентгенограмма покрытия ZrCN-DLC

Расчет межплоскостных расстояний d_{hkl} в полученных покрытиях по положениям дифракционных максимумов показал, что значения d_{hkl} для покрытий являются промежуточными по отношению к нитридной и карбидной фазе (табл. 2). Это дает основание предпо-

Онысько Сергей Романович, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Чекан Николай Михайлович, к.физ.-мат.н., зам. начальника НИЦ «Плазмотег» Физико-технического института НАН Беларуси.

Акула Игорь Петрович, к.т.н., старший научный сотрудник НИЦ «Плазмотег» Физико-технического института НАН Беларуси.

Василевич Иван Борисович, сотрудник НИЦ «Плазмотег» Физико-технического института НАН Беларуси.

Беларусь, ФТИ НАН Беларуси, 220141, г. Минск, ул. Купревича, 1.

ложить, что покрытия представляют собой не конгломерат фаз нитридов и карбидов, а являются монофазными.

Таблица 2. Значения межплоскостных расстояний в пленках ZrCN-DLC

Плоскости	d, Å (стехиометр. состав)		d, Å (эксперимент)		
	ZrN	ZrC d, Å	Процесс 1	Процесс 2	Процесс 3
(111)	2,64	2,71	2,66	2,68	2,66
(200)	2,29	2,35	2,33	2,34	2,34
(220)	1,62	1,66	1,66	1,63	1,64
(222)	1,32	1,36	1,34	1,33	1,30
(311)	1,38	1,42	1,43	1,39	1,41

В работе [2] в качестве фазы, реализующейся в тонких пленках системы Zr-C-N, приводится δ-фаза карбонитрида циркония $Zr(C_xN_{1-x})_{1-y}$ с ГЦК структурой, постоянная решетки которой зависит от соотношения компонент N и C, при этом ее величина находится между 0,458 и 0,470 нм.

Сравнение межплоскостных расстояний, рассчитанных по четко выраженным рефлексам (111), для покрытий, полученных при режимах, представленных в таблице 1, показывает, что при малом количестве поступающего на основу алмазоподобного углеродного материала параметры кристаллической решетки δ-фазы карбонитрида циркония, как и следовало ожидать, ближе к соответствующим параметрам фазы ZrN. При увеличении частоты разрядных импульсов также происходит увеличение $d_{(111)}$, как это видно для покрытий из процесса 2. Однако эта тенденция не прослеживается при дальнейшем росте количества углерода в покрытии. Характеристики межплоскостных расстояний образцов для режимов 1 и 3 мало чем отличаются. При избытке поступающего на подложку углерода кроме образования карбонитрида циркония происходит формирование метастабильной фазы алмазоподобного углерода (АПУ), как это будет видно из анализа спектров РФЭС. Конкурирующий процесс роста межкристаллитных включений АПУ материала становится доминирующим, что вызывает снижение содержания углерода в δ-фазе карбонитрида циркония и приводит к уменьшению постоянной решетки для этой фазы.

Одним из наиболее доступных и распространенных способов нахождения размеров кристаллитов в поликристаллических пленках является анализ уширения рентгеновских дифракционных пиков. Размер кристаллитов может быть оценен с использованием формулы Шеррера:

$$d = \frac{n\lambda}{\beta \cos \theta}$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, нм, θ – угол дифракции, β – полная ширина дифракционного отражения на полувысоте интенсивности пика, n – коэффициент, зависящий от формы частицы. Размер кристаллитов, рассчитанный по вышеприведенной формуле, составил для всех образцов лежит в пределах 2,9–4,0 нм. При этом прослеживается тенденция уменьшения размера зерна кристаллитов с увеличением числа импульсов углеродного источника плазмы т.е. с увеличением содержания углерода в покрытии.

Особенности формирования химических связей между элементами покрытия были исследованы с использованием метода РФЭС. Спектр 3d электронов циркония (рис. 2) включает в себя несколько дублетов, соответствующих связям циркония с азотом и углеродом, а также кислородом в различных соединениях. Во всех образцах можно выделить основной максимум в области $181,7 \pm 0,1$ эВ, который соответствует нитриду циркония ZrN_{1+x} . Пики в области $(179,3 \pm 0,1)$ эВ близки по значению связям Zr-N, Zr-C. Это подтверждается наличием в спектрах N1s максимумов в области $396,4$ – $397,1$ эВ и $395,9$ эВ. Последнее значение несколько ниже, чем полученное для стехиометрического нитрида. Такое значение энергии связи азота приписывают так называемым сверхстехиометрическим ZrN_{1+x} .

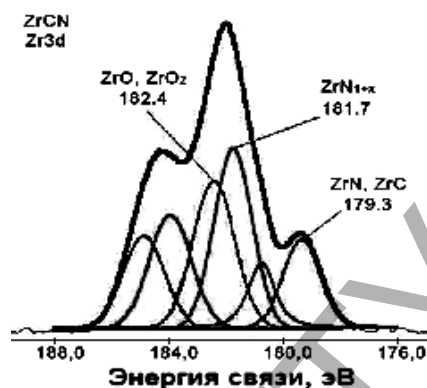


Рис. 2. РФЭ спектр Zr3d

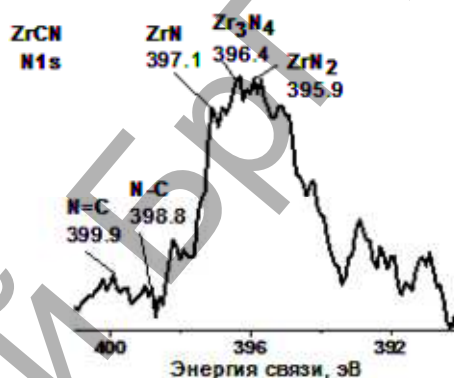


Рис. 3. РФЭ спектр N1s

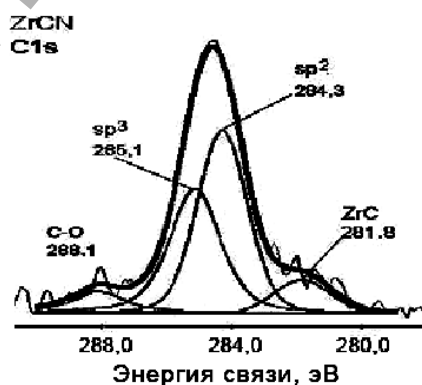


Рис. 4. РФЭ спектр C1s

В спектрах N1s (рис. 3) в области 395,0–398,0 эВ наблюдаются пики, соответствующие соединениям азота с цирконием ZrN_x . Пик в низкоэнергетической области с энергией связи $\sim 398,8$ эВ соответствует N-C связи, $\sim 399,9$ эВ N=C связи [3].

В спектрах C1s (рис. 4) наблюдаются несколько максимумов, наиболее интенсивный из которых приходится на энергию межатомных связей $284,3 \pm 0,1$ эВ, соответствующую связям C-C в углеводородных поверхностных загрязнениях или графите. Пик в области $(281,4$ – $282,7)$ эВ соответствует связи углерода с металлом (Zr-C, Zr-C-N). Достоверно установить принадлежность этой связи карбиду или карбонитриду циркония невозможно из-за близости энергий связи Zr3d в этих соединениях. Пик в области 285,1 эВ свидетельствует о наличии sp^3 -гибридизованных связей и формировании алмазоподобной фазы.

Результаты исследований механических и трибологических характеристик представлены в таблице 3. Можно видеть, что сформированные покрытия обладают высокой твердостью. С ростом содержания углерода в покрытии твердость падает, что вероятно связано с преобладанием sp^2 гибридизованных связей между атомами углерода.

Таблица 3. Характеристики покрытий ZrCN-DLC

№ процесса	Твердость покрытия, ГПа	Коэффициент бессмазочного трения
1	43	0,86
2	30	0,38
3	18	0,17

В то же время значения твердости покрытий из процессов 1 и 2 значительно превосходят аналогичный параметр для покрытий нитрида титана (20–22 ГПа). Заметное влияние углерод оказывает и на трибологические характеристики покрытий. На рис. 5 однозначно можно проследить тенденцию к снижению коэффициента трения с ростом концентрации углерода в наноконпозиционном покрытии. Очевидно, что избыток углерода играет роль твердой смазки в условиях сухого трения. С повышением давления ацетилена в вакуумной камере формируется алмазоподобный углерод с увеличенным содержанием sp^2 -фракции, обеспечивающей низкие коэффициенты сухого трения [4].

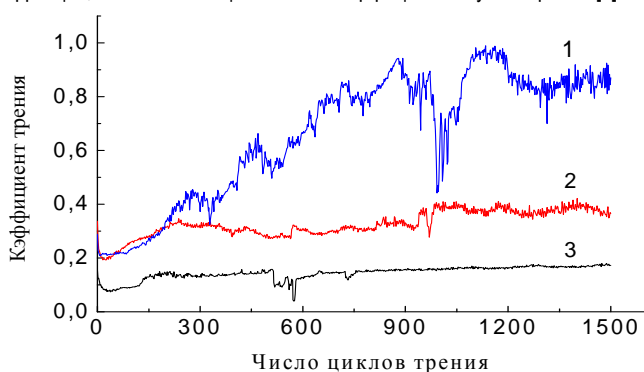


Рис. 5. Коэффициент трения покрытий ZrCN, полученных при различных условиях осаждения (номера кривых соответствуют номерам процесса осаждения покрытий таблицы 1)

Результаты исследований состава и структуры покрытий были использованы при изготовлении экспериментальной партии вырубных пуансонов с износостойкими композиционными покрытиями толщиной порядка 2,5–3,0 мкм на основе карбонитрида циркония и алмазоподобного углерода (рис. 6) для пробивки отверстий диаметром 4,16 и 6,20 мм в детали «тяга» из стали 20, толщиной 4 мм. Пуансоны были изготовлены из инструментальной штамповой стали X12M и стали Sverker 21 (Швеция), примерно одинаково легированных хромом, однако со значительно большими добавками молибде-



Рис. 6. Вырубные пуансоны с износостойкими покрытиями карбонитрида циркония

на и ванадия в шведской стали.

Испытания пуансонов с покрытиями проводились на машиностроительном предприятии ОАО «Брестмаш» на 63 тонном штамповочном прессе марки K2128E. Эксплуатация пробивного инструмента прекращалась в результате абразивного износа защитного покрытия и последующего за этим притупления режущей кромки.

Результаты производственных испытаний сведены в таблице 4. Как следует из данных по количеству пробивок, покрытия обеспечивают увеличение стойкости инструмента в несколько раз (в среднем в 3,2 раза). Обращает на себя внимание более высокая эффективность применения покрытий, полученных при давлении ацетилена $1,50 \times 10^{-2}$ Па. Число пробивок в данном случае составило 10600, что означает увеличение рабочего ресурса в 3,7 раза по сравнению с пуансонами без покрытия. Следует отметить, что более результативным оказалось применение покрытий на инструменте из стали Sverker 21, полученных как при высоком, так и низком давлении ацетилена. Этот результат является следствием более высокой твердости, достигаемой при закалке пуансонов из стали Sverker 21, обеспечивающей меньшую деформацию покрытий под нагрузкой и меньшее их изнашивание.

За все время испытаний не было установлено случаев выхода из строя оснастки в результате ее поломки.

Результаты испытаний свидетельствуют, что твердость покрытий хотя и относится к основополагающим свойствам износостойких покрытий, но не является единственным. Рабочий ресурс композиционных покрытий на основе карбонитрида циркония и алмазоподобного углерода с твердостью 30 ГПа примерно на 40% выше, по сравнению с покрытиями с твердостью 43 ГПа. Кроме различия в твердости покрытия характеризуются сильно отличающимися значениями коэффициента трения, причем более низкие его значения имеют менее твердые покрытия. В работе [5] в качестве параметра, определяющего износостойкость покрытий, предлагается использовать отношение твердости к производству модуля Юнга на коэффициент трения. Так как алмазоподобный углерод выполняет роль прослойки между кристаллическими зёрнами ZrCN – основного материала покрытия, его роль в упругих свойствах покрытия (в отличие от твердости) не велика. Поэтому в данном случае в качестве сравнительно критерия износостойкости можно воспользоваться отношением твердости к коэффициенту бессмазочного трения. Для покрытий, полученных при давлении $0,75 \times 10^{-2}$ Па, оно составляет 50 ед., а при в два раза большем давлении – 79 ед., т.е. износостойкость второй группы покрытий должна быть выше, чем в первой, что и продемонстрировали результаты производственных испытаний.

Таблица 4. Результаты испытаний цилиндрических пуансонов

№ группы	Пуансоны с покрытием ZrCN-DLC	Контрольные образцы (без покрытия)			
		X12M	Sverker 21	X12M	Sverker 21
		Количество пробивок			
1	$P(C_2H_2) = 0,75 \times 10^{-2}$ Па	6100	7700	2300	2800
2	$P(C_2H_2) = 1,50 \times 10^{-2}$ Па	8920	10600		

Заключение. Разработан тонкопленочный композиционный материал, представляющий собой нанокристаллический карбонитрид циркония и аморфный алмазоподобный углерод для вырубных пуансонов, способный эффективно противостоять трещинообразованию и усталостному износу в условиях ударных нагрузок.

Определены условия формирования монофазного материала системы Zr-C-N в виде δ -фазы, имеющей гранецентрированную решетку типа NaCl, формирующейся по типу твердого раствора замещения с преимущественной ориентацией (111). Покрытия характеризуются мелкодисперсной структурой с размерами зерен 5–8 нм. Показано, что при одновременном осаждении из смешанных потоков плазмы циркония и углеродной плазмы избыток углерода для кристаллитов ZrCN формирует аморфную матрицу с наличием гибридных sp^3 связей, характерных для структуры алмаза. Алмазоподобный углерод стабилизирует ультрадисперсную структуру δ -фазы ZrCN, обеспечивает высокую твердость, хорошие триболо-

гические характеристики, препятствует коалесценции зерен кристаллитов и зернограничной диффузии кислорода при эксплуатации покрытий в условиях высоких нагрузок и температур.

Испытания пуансонов из стали X12M и Sverker 21 с нанесенными покрытиями показали в условиях реального производства увеличение срока эксплуатации штампового инструмента до 3,8 раза.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abadias, G. Stress and preferred orientation in nitride-based PVD coatings // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 2223–2235.
2. Binder, S. Phase equilibria in the systems Ti-C-N, Zr-C-N and Hf-C-N / S. Binder, W. Lengauer, P. Eitlmayer, J. Bauer, J. Debuigne, M. Bohn // Journal of Alloys and Compounds. – Vol. 217. – Issue 1. – P. 128–136.
3. Zocco, A. Mechanical and tribological properties of CNx films deposited by reactive laser ablation / A. Zocco, A. Perrone, E. Broitman, Z. Czigan, L. Hultman, M. Anderle // Diam. Relat. Mater. – 2002. – Vol. 11. – P. 98–104.
4. Chekan, N.M. New Technique of DLC Coating Obtaining for Tribology Applications / N.M.Chekan, V.V. Akulich, E.V. Ladutko, Y. Zhuang, I.P. Akula // Advanced Tribology. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – P. 722–723.
5. Neuville, S. Quantum electronic mechanisms of atomic rearrangement during growth of hard carbon films // Surface and Coatings Technol. – 2011. – Vol. 206. – P. 703–726.

Материал поступил в редакцию 18.11.14

ONYSKO S.R., HVISEVICH V. M., CHEKAN N. M., SHARK I.P., VASILEVICH I.B. Nanocrystal coverings of the shtampova elements of equipment

A composition coatings onto blanking punches based on nanocrystal zirconium carbonitride and amorphous diamond-like carbon have been developed. The thin film material was obtained from the mixed flows of pulsed carbon plasma and DC zirconium plasma. The coating structure consists of δ -phase of $Zr(C_xN_{1-x})_{1-y}$ having crystallites in size of 5–8 nm embedded in the amorphous carbon matrix. Factory testing of the coated blanking punches demonstrated the increase of the average service life of the punches as much as 3.2 times.

УДК 628.544

Петров О.А., Романовский В.И.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СВЕРХКАВИТИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

Введение. Разрушение твердых материалов относится к числу основных задач большинства промышленных производств и касается практически всех сфер жизнедеятельности человека, одним из решений которой является измельчение и диспергирование твердых материалов, находящихся в жидкой среде.

Согласно Международной патентной классификации (МПК), сельское хозяйство является классом «A01» в мировой иерархии первого раздела удовлетворения жизненных потребностей человека. То есть, именно этот аспект жизнедеятельности предполагает освоение и реализацию совокупности решений специфических комплексных задач, в основе которых заложен базовый вектор в развитии мировой науки, технологии и техники. Следовательно, один из главных акцентов в его усовершенствовании и активном продвижении должен быть сосредоточен как раз в этом направлении.

По утверждениям Международной продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) ситуация на планете является практически чрезвычайной. Для нашего государства эта проблема, конечно, не стоит сейчас так остро. Однако, руководствуясь перечнем приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, согласно Постановлению Совета Министров № 585 от 19.04.2010 п. 9.5 «Технологии и методы совершенствования породного состава, содержания, кормления, воспроизводства, ветеринарной защиты и целевого использования сельскохозяйственных жи-

вотных», этот пункт является одним из ключевых условий ускоренного развития агропромышленного комплекса страны.

То есть, любое разумное, перспективное предложение в данном русле является актуальным, не только в рамках развития нашей страны, но и целенаправленно в мировом масштабе. Так, успешное выращивание молодняка крупного рогатого скота (КРС) требует получения и использования кормов, плюс комплексная механизация и автоматизация связанных с этим технологических процессов.

Одним из путей интенсификации приготвления суспензий является применение новых нетрадиционных аппаратов для получения твердых материалов, основанных на физических эффектах, таких как электрический разряд, ультразвук, гидродинамическая кавитация и т.д. Все эти процессы так или иначе связаны с явлением кавитации.

На кафедре машин и аппаратов химических и силикатных производств Белорусского государственного технологического университета была создана и испытана установка с применением статического гидродинамического сверхкавитирующего аппарата для получения суспензий и эмульсий, соответствующих необходимым требованиям.

Цель работы – разработать методику расчета гидродинамических сверхкавитирующих аппаратов.

Методику разработки гидродинамических сверхкавитирующих аппаратов рассмотрим на примере использования двух типов кавитаторов [1–4]: первый представляет собой металлические пластинки

Петров О.А., доцент Белорусского государственного технологического университета.

Романовский В.И., ассистент Белорусского государственного технологического университета.

Беларусь, БГТУ, 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.