

Таблица 4 – Свойства образцов пигментов, полученных из отработанных электролитов меди и никелирования

Состав пигмента	Маслоемкость, г/100 г продукта		Укрывистость, г/м ²	рН водной суспензии	Цвет
	I рода	II рода			
Cu ₃ (PO ₄) ₂ ·3H ₂ O	27,9	69,75	163,4	6-7	голубой
Cu ₃ (PO ₄) ₂	18,6	37,2	171,1	6-7	бирюзовый
Гидроксид никеля	20,5	27,9	151,5	6,5-7,5	зеленый
NiO	20,5	27,9	159,0	6,5-7,5	черный
Ni ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O	50,8	83,7	111,0	7-8	светло-зеленый
Ni ₃ (PO ₄) ₂ (аморфный)	65,0	86,0	147	7-8	лимонный
Ni ₃ (PO ₄) ₂ (кристаллический)	27	51,1	93,6	7-8	зеленый

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вансовская, К.М. Гальванические покрытия [Текст] / К.М. Вансовская. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 198 с.
2. Зубченко, В.Л. Гибкие автоматизированные гальванические линии [Текст] / В.Л. Зубченко. – Москва: Машиностроение, 1989. – 672 с.
3. Попов, В.М. Централизованное обезвреживание жидких металлосодержащих растворов, образующихся на предприятиях г. Курска [Текст] // Известия Курского государственного технологического университета. – 2009. – №1(26).
4. Марцуль, В.Н. Инвентаризация гальванических шламов и осадков очистных сооружений, образующихся на предприятиях Республики Беларусь [Текст] / В.Н. Марцуль, А.В. Лихачева, Л.А. Шибека, О.С. Залыгина, В.И. Романовский, В.В. Ходин // Труды БГТУ: Химия и технология неорганических веществ. – 2012. – № 3. – С. 76–83.
5. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.investinbelarus.by/docs/pigment_production_rus.pdf – Дата доступа: 06.02.2016.
6. Юсупов, Р.А. Расчет кривых потенциометрического титрования солей металлов в условиях образования осадков [Текст] / Р.А. Юсупов, Э.Р. Нурисламов // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. – 2002. – № 11 – С. 48–53.
7. Беленький, Е.Ф. Химия и технология пигментов, изд. третье, перераб. и доп. [Текст] / Е.Ф. Беленький. – Ленинград: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1960. – 756 с.
8. Щегров, Л.Н. Фосфаты двухвалентных металлов [Текст] / Л.Н. Щегров. – Киев: Наукова думка, 1987. – 212 с.
9. Сулегин, Д.А. Получение гидроксолей никеля [Текст] / Д.А. Сулегин, И.И. Юрасова // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – № 8 (32).
10. Горловский, И.А. Оборудование заводов лакокрасочной промышленности [Текст] / И.А. Горловский, Н.А. Козулин. – Ленинград: Химия, 1980. – 200 с.
11. Пигмент-наполнитель «Каферин»: ТУ РБ 04778771.036-97. – Введ. 05.02.1997. – Минск, 1997. – 16 с.

Материал поступил в редакцию 05.03.2017

CHEPRASOVA V.I., ZALYGINA O.S. Research of the possibility of receiving pigments from the fulfilled medneniya electrolytes and nickel plating

The work considers the investigation deposition of copper and nickel ions from the spent copper and nickel electrolytes by sodium phosphate and sodium hydroxide. Studied phase composition obtained precipitations, selected temperature heat treatment of precipitations depending on the precipitant and obtained copper phosphate, nickel phosphate, nickel oxide, which may be used as pigments. Investigate its compliance with GOST on such indicators as the oil absorption and spreading rate.

Obtained results allow to solve the problem of utilization of spent copper and nickel electrolytes solutions, as well as to expand the raw material base for the production of pigments.

УДК 621.794.61

Онысько С.Р., Хвусевич В.М., Чекан Н.М., Акула И.П., Пушкарев А.В.

НАПРЯЖЕНИЯ В ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЯХ КАРБОНИТРИДА ЦИРКОНИЯ

Введение. Износостойкие покрытия стали неотъемлемым атрибутом современных металло- и деревообрабатывающих инструментов. Если до недавнего времени основным типом покрытия был нитрид титана, который использовался как универсальное покрытие для различных инструментов и условий обработки, то на сегодняшний день предпочтение отдается более специализированным покрытиям. Примером может служить известная японская корпорация Mitsubishi, которая для большой гаммы выпускаемого инструмента разработала около 30 различных покрытий, применяемых в зависимости от типа инструмента и обрабатываемого материала, а также условий обработки [1]. При этом наряду с основным свойством

упрочняющих покрытий, твердостью, принимается во внимание их способность противостоять трещинообразованию при ударных нагрузках [2], трибологические характеристики [3]. Особое внимание уделяется покрытиям, выдерживающим высокие температуры при высокоскоростной обработке металлов и плохо отводящих тепло древесных материалов [4]. Наиболее простым решением для комбинирования необходимых свойств покрытий при современной обработке материалов может выступать нанесение на инструмент многослойных покрытий, каждый слой из которых дополняет или усиливает свойства других. Примером такой системы являются трехслойные покрытия TiN/Al₂O₃/TiCN шведской компании Sandvik, в которых слой

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.-м.н., заместитель начальника НИЦ «Плазмotech» Физико-технического института НАН Беларуси.

Акула Игорь Петрович, к.т.н., с.н.с. НИЦ «Плазмotech» Физико-технического института НАН Беларуси.

Беларусь, г. Минск, улица Академика Курчевича, 10.

Пушкарев Анатолий Васильевич, к.-физ.м.н. Научно-практического центра по материаловедению НАН Беларуси.

Беларусь, г. Минск, улица Петруся Бровки, 19.

TiN/Al₂O₃ состоит из субслоев наноразмерной толщины [5]. Однако нанесение многослойных покрытий нитридной и оксидной керамики с непрерывным требованием отсутствия размытых границ очень сильно усложняет производственный процесс и нередко требует использования в одном технологическом цикле совершенно различных систем их осаждения. Разработанные в последние годы наноконпозиционные покрытия, состоящие из перемежающихся с аморфным материалом ультрадисперсных кристаллитов, во многом превосходят другие типы покрытий и демонстрируют высокую эффективность в конкретных применениях (см. обзорную статью [6]).

Авторами настоящей работы создан новый тип композиционных покрытий на основе нанокристаллического карбонитрида циркония и аморфного алмазоподобного углерода ZrCN:DLC [7]. Ранее была показана его высокая эффективность при использовании на вырубных пуансонах, изготовленных из стали X12MФ (Россия) и Sverker 21 (Швеция), – покрытия обеспечивают увеличение число пробивок более чем в 3 раза [8]. Дальнейшее совершенствование покрытий требует детального исследования их структуры, фазового состава и, что особенно важно, их напряженного состояния. В силу ряда особенностей роста твердых и сверхтвердых покрытий PVD методом, а также сильного различия температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и основы, на которую оно наносится, в формируемом тонкопленочном материале возникают сильные внутренние напряжения, достигающие нескольких гигапаскалей. На фоне некоторого положительного эффекта увеличения твердости напряжения крайне негативно сказываются на адгезии покрытий. При циклических ударных нагрузках они способствуют растрескиванию, шелушению и в конечном итоге преждевременному износу покрытий. В работе [9] показана прямая зависимость между величиной износа боковой поверхности твердосплавных пластин с нанесенными покрытиями TiN и ZrCN и уровнем напряжений в них.

В настоящей работе методами рентгеновской дифракции при использовании специальной методики $\sin^2 \psi$ исследуется напряженное состояние композиционных покрытий системы ZrCN:DLC, полученных методом физического осаждения в вакууме.

Получение покрытий и методы исследований. Осаждение покрытий осуществлялось на вакуумной установке УВНИПА 1-001, оснащенной катодно-дуговым источником плазмы. В качестве катода использовался цирконий чистотой 98% с диаметром рабочего торца 40 мм. Остаточное давление в вакуумной камере, при котором начинался процесс осаждения покрытий, составляло $3,5 \times 10^{-3}$ Па. Осаждение покрытий осуществлялось при токе дуги 90 А и давлении смеси реакционных газов $1,5 \times 10^{-2}$ Па, в качестве которых в равных пропорциях использовался азот и ацетилен. Детальное описание метода получения приводится в работе [8]. Покрытия осаждались на полированные пластины из инструментальной стали X12M и твердого сплава ВК10.

Толщина полученных покрытий измерялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 по смещению интерференционных полос на специально создаваемой границе пленка-основа. Для всех образцов толщина покрытий составляла 1,5 мкм. Исследование напряжений осуществлялось методами рентгенографии с помощью дифрактометра ДРОН-3 на длине волны рентгеновского излучения 0,154178 нм (K α 1 меди).

Определение напряжений. Характер взаимодействия тонких пленок и покрытий с основой всецело определяет напряжения первого типа в такого рода системах. Отсутствие каких-либо сил в направлении нормали к основе и возможности свободной деформации в этом направлении позволяет рассматривать покрытие как двусосную напряженную систему. Напряжения σ_x и σ_y действуют вдоль поверхности пленки и отсутствуют в направлении нормали к пленке Z, как показано на рис. 1. Для поликристаллического покрытия межплоскостные расстояния d максимально уменьшаются, если они расположены перпендикулярно основе, т. е. в направлении действия

напряжений (плоскости (b) и (c) на рис. 1), и максимально увеличиваются для плоскостей, ориентированных параллельно основе (плоскости (a) на рис. 1) по сравнению с межплоскостными расстояниями недеформированных кристаллитов. Для произвольно ориентированного кристаллита, развернутого в плоскости покрытия на угол φ и отклоненного от вертикали (нормали к плоскости основы) на угол ψ , величина относительной деформации определяется выражением [10]:

$$\frac{d-d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sin^2 \psi (\sigma_x \cos^2 \varphi + \sigma_y \sin^2 \varphi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y), \quad (1)$$

где d_0 – межплоскостное расстояние для недеформированного кристаллита, E и ν модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно. В условиях получения экспериментальных образцов покрытий использовались поликристаллические плоскопараллельные пластинки из стали и твердого сплава, расположенные перпендикулярно потоку плазмы. В таком случае можно а priori предположить равенство напряжений, действующих вдоль осей X и Y, что приводит к существенному упрощению выражения (1):

$$\frac{d-d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma \sin^2 \psi - \sigma \frac{2\nu}{E}. \quad (2)$$

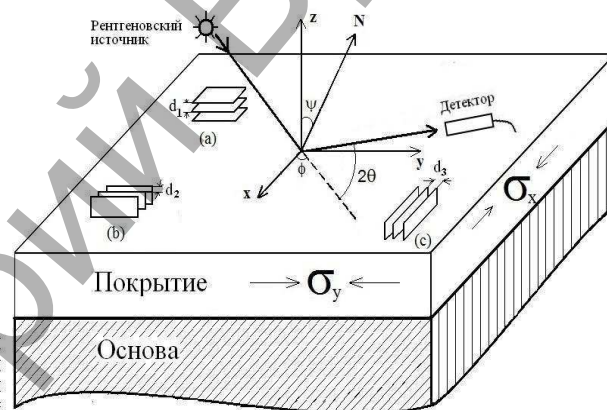


Рисунок 1 – Поясняющая схема для определения двусосных напряжений в покрытии

Из (2) следует, что при равновеликих напряжениях вдоль двух указанных направлений исчезает зависимость от азимутального угла в положении кристаллитов относительно плоскости покрытия.

Величина межплоскостных расстояний однозначно связана с положением пика брегговской дифракции

$$2d \sin \theta = \lambda n, \quad (3)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, n – порядок дифракции. В обычно применяемой геометрии Брегга–Бретано расположения источника излучения, исследуемого образца и приемника излучения в отражающее положение входят только те кристаллографические плоскости, нормаль которых лежит в плоскости падающего и отраженного луча и является биссектрисой угла между ними. Располагая основу с покрытием так, чтобы ее нормаль совпадала с нормалью дифракции, возможно получить межплоскостные расстояния для плоскостей, ориентированных параллельно поверхности основы и покрытия. Рассчитывая межплоскостные расстояния из условия дифракции (3) при различных углах наклона ψ образца покрытия в плоскости падения и отражения или плоскости, ей перпендикулярной, можно получить зависимость d от ψ . В статье Пола Преви [10] изложена методика определения напряжений в двухосно напряженных системах. Согласно данной методике выполняется построение зависимости d от $\sin^2 \psi$, которая в соответствии с формулой (2) должна быть прямолинейной. Угол наклона позволяет определить знак и уровень напряжений в покрытии без необходимо-

сти знать значение межплоскостных расстояний ненапряженных кристаллитов в каждом конкретном случае их получения. Это является особенно важным для исследуемой системы твердых растворов $ZrC_{x_1}N_{y_1}$, имеющих ГЦК решетку по типу каменной соли, у которых d сильно зависит от содержания углерода и азота [11].

На рис. 2 показаны совмещенные дифрактограммы при $\psi = 0$ от образцов покрытий, полученных на основе из стали и основе из твердого сплава. На рис. 2 также присутствуют дифрактограммы для поликристаллического карбонитрида циркония стехиометрического состава $ZrC_{0.5}N_{0.5}$ [12], используемые в данном случае в качестве образца-сравнения. Для покрытий на обоих типах основ кривые отражения рентгеновского излучения практически совпадают. В отличие от образца-сравнения для них наблюдается перераспределение интенсивности пиков, приводящее к сильному возрастанию отражения от плоскостей с индексами Миллера (111), и означающее, что полученные покрытия являются текстурированными с осью текстуры $\langle 111 \rangle$. Степень текстурирования покрытий η можно оценить по отношению интенсивности пика I_{111} к суммарной интенсивности всех учитываемых N пиков:

$$\eta = \left(\frac{N r_{111} I_{111}}{\sum_{hkl} r_{hkl} I_{hkl}} - 1 \right) / (N - 1), \quad (4)$$

где r – относительная интенсивность пиков поликристаллического нетекстурированного покрытия.

Расчитанные значения относительной интенсивности пиков поликристаллического нетекстурированного покрытия, для которого рентгенограмма приведена на рис. 2, составляют следующие значения $r_{111}=1$, $r_{200}=1,85$, $r_{220}=2,08$, $r_{311}=1,61$ и $r_{222}=5,26$. Как видно, при расчете значений r_{hkl} за основу принималась интенсивность рефлекса (111), полученного в результате отражения от наиболее плотноупакованных плоскостей ГЦК решетки, которая делилась на интенсивность других рассматриваемых рефлексов.

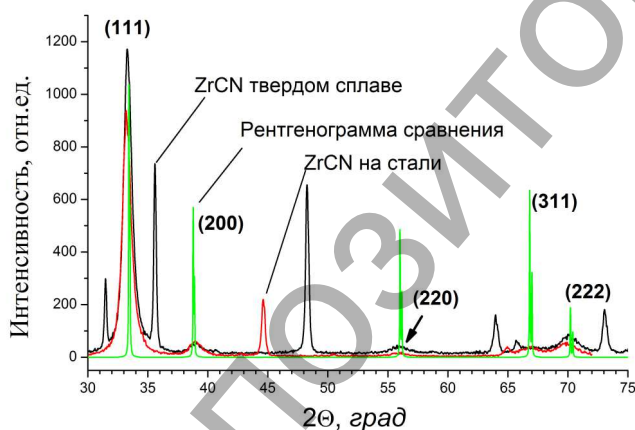


Рисунок 2 – Рентгенограммы покрытия ZrCN:DLC, нанесенного на твердый сплав ВК6 и инструментальную сталь Х12М, а также рентгенограммы сравнения для нетекстурированного поликристаллического карбонитрида циркония стехиометрического состава $ZrC_{0.5}N_{0.5}$ [13]

С учетом этих коэффициентов и значений интенсивностей пиков, полученных от экспериментальных образцов покрытий, расчет по формуле (4) дает $\eta=49\%$ для покрытия на твердом сплаве и $\eta=56\%$ для покрытий на стали. Это означает, что из всех имеющих кристаллитов в покрытии приблизительно половина расположена так, что плоскость (111) направлена параллельно поверхности основы. При этом сталь оказывает более сильное ориентирующее действие на покрытие, что может быть обусловлено ее более высокой поверхностной энергией и большей способностью к деформации,

необходимой для согласования решеток покрытия и основы при ориентированном росте.

При исследовании деформации кристаллической решетки покрытия и связанного с ней напряжения необходимо максимально увеличить диапазон изменений угла ψ для корректного выполнения указанного выше построения Преви и повышения точности определяемых величин. При наклоне образца так, что нормаль его поверхности находится в плоскости падающего и отраженного луча, величина изменения ψ ограничивается значением угла дифракции θ , как это видно из рис. 1 (при практическом получении рентгенограммы он гораздо меньше предельного). Поэтому для исследований изменения межплоскостных расстояний необходимо использовать рефлексы, идущие под как можно большими углами, учитывая при этом то, что интенсивность отражений от плоскостей с большими индексами Миллера имеет очень малое значение. Как можно видеть из приведенной на рис. 2 дифрактограммы кроме интенсивного рефлекса (111) имеются еще три хорошо различимых рефлекса, дальним из которых является (222). Однако, учитывая, что плоскости (222) как и плоскости (111) являются диатропными, рефлекс (222) будет быстро исчезать при наклоне основы с покрытием. В связи с этим в настоящей работе велось измерение углов дифракции для достаточно хорошо различимого рефлекса (220) (на рис. 2 помечен стрелкой).

На рис. 3 представлены интенсивность и положение образца покрытия на стали на различные углы ψ , указанные на рисунке. Можно видеть, что происходит систематическое смещение положения пика в область больших дифракционных углов. Это означает уменьшение межплоскостного расстояния для изучаемой системы плоскостей (220). При этом возрастает интенсивность отражения, свидетельствующая о том, что увеличивается количество кристаллитов, плоскость (220) которых развернута по отношению к плоскости покрытия. Как видно из рис. 3, в большинстве своем кристаллиты расположены приблизительно под углом 20° к поверхности основы. Аналогичные зависимости были получены и для покрытия на твердом сплаве.

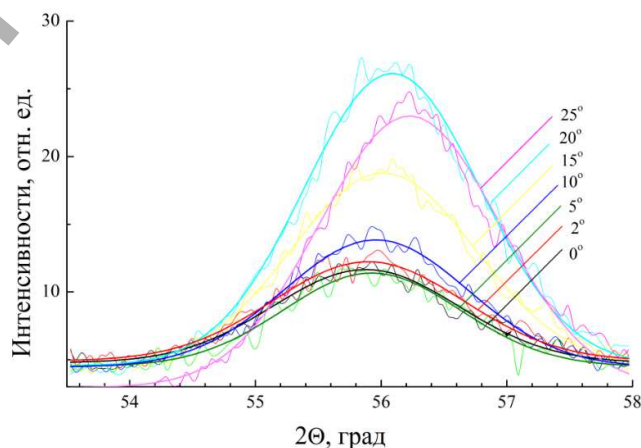


Рисунок 3 – Эволюция пика (220) дифракции при различных значениях угла поворота образца с покрытием ZrCN:DLC, нанесенного на основу из стали

На рис. 4 приведены графики зависимости межплоскостного расстояния d_{220} от $\sin^2 \psi$ для композиционного покрытия карбонитрида циркония и алмазоподобного углерода нанесенного на сталь и твердый сплав. Экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью и подтверждают корректность рассмотренной модели двусосных напряжений, несмотря на то, что текстурированное покрытие не является изотропным континуумом, в приближении которого были выведены соотношения (1) и (2). Несколько неожиданным является тот факт, что для более сильно текстурированного покрытия на основе из стали все экспериментальные точки ложатся практически на одну прямую, в то время как для менее текстурированного покрытия на твердом сплаве

наблюдается существенно больший разброс значений по отношению к аппроксимирующей прямой.

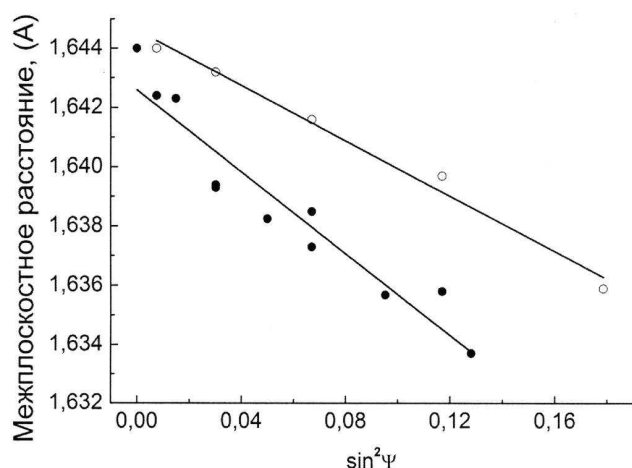


Рисунок 4 – Зависимость межплоскостного расстояния для кристаллографических плоскостей (220) карбонитрида циркония, осажденного на основу из стали (○) и твердого сплава (●)

Получаемый из графика коэффициент k линейной зависимости d от $\sin^2 \psi$ позволяет рассчитать уровень напряжений в покрытии. Из (2) имеем:

$$d = k \sin^2 \psi + d_0 (1 - 2\nu\sigma / E), \quad (5)$$

$$k = d_0 \sigma (1 + \nu) / E \Rightarrow \sigma = \frac{kE}{d_0 (1 + \nu)} \quad (6)$$

График рассматриваемой линейной функции пересекает ось ординат в точке:

$$d(0) = d_0 (1 - 2\nu\sigma / E). \quad (6)$$

Комбинируя (5) и (6), получаем выражение для расчета напряжений:

$$\sigma = \frac{kE}{d(0)(1 + \nu) + 2\nu k}. \quad (7)$$

Линейная аппроксимация была выполнена с помощью программы Origin Pro 8, которая позволила определить значения k - 0,00466 нм и -0,006901 нм для образца покрытия на стали и твердом сплаве соответственно. Значение приведенного модуля Юнга $E_r = E / (1 - \nu^2)$ покрытий карбонитрида циркония, содержащих аморфный углерод, был взят из работы [13], в которой также использовался катодно-дуговой метод нанесения покрытий и в качестве реакционных газов применялась смесь азота и ацетилена. Полученный из анализа нагрузочно-разгрузочных кривых наноиндентирования модуль Юнга составил 320 ГПа. Данные по коэффициенту Пуассона для карбонитрида циркония отсутствуют. Обычно для нитридных керамик он не превышает значение 0,23, которое принималось во внимание при расчетах. Полученные значения напряжений в покрытии составили -6,9 ГПа и -9,9 ГПа для покрытия на стали и покрытия на твердом сплаве соответственно. Знак “-“ означает, что напряжения являются сжимающими.

Полученные результаты показывают, что в исследованных композиционных покрытиях нанокристаллического карбонитрида циркония и алмазоподобного углерода существует очень высокий уровень остаточных напряжений, и это требует особо тщательной подготовки поверхности основы для обеспечения достаточно сильной адгезии покрытия во избежание его отслаивания от основы. Обращает на себя внимание, насколько сильно остаточные напряжения зависят от твердости и упругой жесткости основы; для твердого сплава их уровень почти в полтора раза выше по сравнению со сталью. Это согласуется с данными других работ, в частности работы [13], в которой зафиксированы сжимающие напряжения на уровне 8 ГПа в покрытиях подоб-

ного типа, осажденных на подложку из кремния, материала по твердости расположенного между закаленной сталью X12M и сплавом ВК6.

Заключение. Методами рентгенографии исследована структура композиционных покрытий ZrCN:DLC, полученных на основе из инструментальной стали X12M и твердого сплава ВК6. Показано, что полученные пленки являются текстурированными с осью текстуры $\langle 111 \rangle$, направленной по нормали к поверхности основы. При этом сталь оказывает большее ориентирующее действие на кристаллиты покрытия, чем твердый сплав, обеспечивая степень текстурирования на уровне 60%. Используя метод анализа смещения положения пиков рентгеновской дифракции $\sin^2 \psi$, определены внутренние сжимающие напряжения в покрытиях на уровне 7–10 ГПа, в зависимости от материала подложки. Установлено, что твердость основы оказывает сильное влияние на уровень ростовых напряжений в исследованных покрытиях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Токарный инструмент и вращающийся инструмент. Общий каталог. – Mitsubishi Materials: Man Lithoman, 2012. – 580 с.
2. Wang, Y.X. Toward hard yet tough coatings / Y.X. Wang, S. Zhang // Surface and Coating Technology. – 2014. – Vol. 258. – P. 1–16.
3. Calis, H. Selection of boron based tribological hard coatings using multi-criteria decision making methods / Materials and Design. – 2013 – Vol. 50. – P. 742–749.
4. Ratajski, J. Warcholiński. Hard coatings for woodworking tools – a review / J. Ratajski, W. Gulbiński, J. Staśkiewicz, J. Walkowicz, P. Myśliński, A. Czyżniewski, T. Suszko, A. Gilewicz // B. J. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2009. – Vol. 37. – P. 668–674.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/smallparts/P127-132.pdf
6. Veprek, S. Industrial application of superhard nanocomposite coatings / S. Veprek, M.J.G. Veprek-Heijman // Surface and Coating Technology – 2008. – Vol. 202. – P. 5063–5073.
7. Чекан, Н.М. Упрочняющие градиентные покрытия на основе карбонитридов циркония для штамповой оснастки / Н.М. Чекан, С.Р. Онысько, В.В. Акулич, И.П. Акула, Е.В. Ладутько, Н.В. Логуновская // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы IV Международной научно-технической конференции. 19–21 октября 2009г., Минск, Беларусь. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2009. – Книга 3. – С. 185–190.
8. Чекан, Н.М. Износостойкие нанокристаллические покрытия для штамповой оснастки / Н.М. Чекан, И.П. Акула, И.Б. Василевич, В.М. Хвисевич, С.Р. Онысько // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы IX Международной научно-технической конференции. 16–18 сентября 2014 г., Минск, Беларусь. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Т. 2. – С. 6–16.
9. Concalo, O. Influence of the coating residual stresses on the tool wear / O. Concalo, V. Garcia Navas, B. Coto, I. Bengoetxea, U. Ruiz de Gopegi. – M.: Procedia Engineering, 2011. – Vol. 19. – P. 106–111.
10. Prevey, P.S. X-ray Diffraction Residual Stress Techniques, Metals Handbook. 10. Metals Park: American Society for Metals, 1986. – P. 380–392.
11. Khan, I.A. Deposition of zirconium carbonitride composite films using ion and electron beams emitted from plasma focus device / I.A. Khan, S. Jabbar, T. Hussain, M. Hassan, R. Ahmad, M. Zakoullah, R.S. Rawat // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2010. – Vol. 268. – P. 2228–2234.
12. Kosukhin, V.V. Zirconium nitride and carbonitrides coatings obtained by the chemical vapor deposition (CVD) method / V.V. Kosukhin, V.F. Funke, V.I. Minashkin, V.S. Smirnov, Y.P. // Efremov INOMAF, 1987. – Vol. 23. – P. 52–56.
13. Zhou, F. Effect of carbon content on nanostructural, mechanical and electrochemical characteristics of self-organized nc-ZrCN/a-CNx nanocomposite films / F. Zhou, K. Fu, B. Liao, J. Yu, Ch. Yang, X. Zhang // Applied Surface Science, 2015. – Vol. 327. – P. 350–357.

Материал поступил в редакцию 28.12.2016

The structure of ZrCN:DLC composite coatings on X12M tool steel and BK6 cemented carbide substrates obtained by the cathodic arc deposition in the milieu of reactive gases of nitrogen and acetylene was investigated. The coatings reveal strong (111) texture. The steel substrate influences more high texture level compared to cemented carbide substrate. Compressive stresses of 7–10 GPa were received from the analyzes of X-ray diffraction pick sifts when coatings were tilted in the diffraction plane ($\sin^2 \psi$ method). It was determined that substrate hardness exerts a strong influence on the compressive stresses in the coatings investigated.

УДК 621.81 (075)

Санюкевич Ф.М., Монтик С.В.

ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

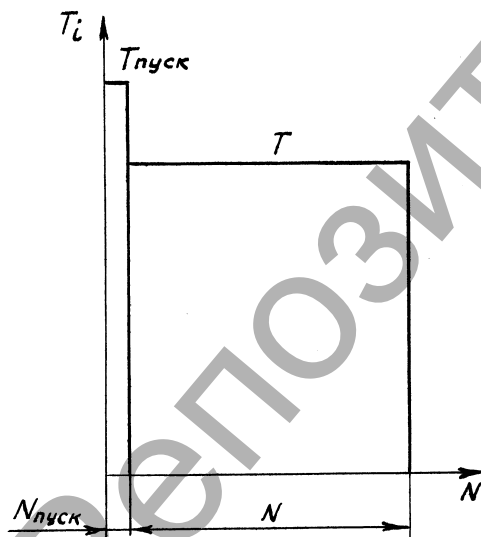
Введение. Практика использования зубчатых передач в приводах различных машин показывает, что их нагрузки в виде вращающих моментов T могут быть постоянными и переменными. Режимы со строго постоянной нагрузкой встречаются довольно редко. Профессор М.Н. Иванов [1] считает, что к режиму постоянной нагрузки следует относить режимы с отклонениями до 20%.

Постоянный режим нагрузки является наиболее тяжелым для зубчатой передачи, поэтому его принимают в качестве расчетного, как наихудший случай нагрузки, для передач с неопределенными режимами нагрузки.

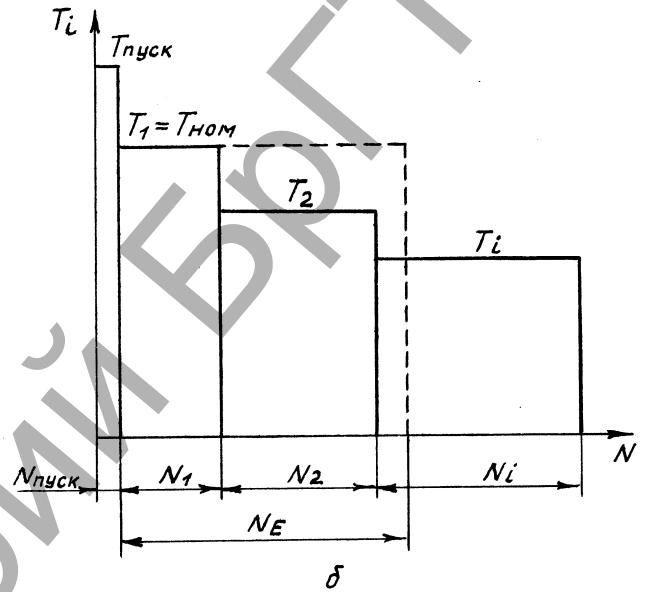
В большинстве случаев практики зубчатые передачи работают при переменных режимах нагрузки (параметры цикла, например, значение нагрузки T и, следовательно, напряжения σ_{\max} , σ_m изменяются во времени).

Закон нагружения передачи задают графиком в координатах T - N (T – нагрузка в виде вращающего момента; N – число циклов нагружения зуба или время работы).

На рис. 1,а показан график (циклограмма вращающих моментов T в передаче) при постоянном режиме нагрузки, на рис. 1,б – при переменном режиме нагрузки. Циклограмму составляют путем упорядочения нагрузок, начиная с максимальной.



а



а – постоянный режим нагрузки; б – переменный режим нагрузки с заменой эквивалентным постоянным режимом нагрузки с числом циклов нагружения $N_э$

Рисунок 1 – Циклограмма вращающих моментов в передаче

Кратковременно действующие при пуске двигателя максимальные моменты перегрузки $T_{\text{пуск}}$ используют при проверке передачи на контактную и изгибную прочность при кратковременной перегрузке. При расчете передачи на сопротивление усталости кратковременные перегрузки $T_{\text{пуск}}$ обычно не учитывают, так как по малости числа циклов нагружения $N_{\text{пуск}}$ они не вызывают усталости.

В расчетах на сопротивление усталости фактический переменный режим нагрузки заменяют эквивалентным (по усталостному воздействию) постоянным режимом (на рис. 1,б показан штриховыми линиями). Зубчатое колесо, работая при переменном режиме нагрузки, имеющем несколько ступеней, на i -й ступени испытывает число циклов нагружения $N_{\Sigma i}$:

$$N_{\Sigma i} = 60cnL_{hi} \quad (1)$$

где c – число зацеплений зуба шестерни или колеса за один их оборот; n – частота вращения (шестерни или колеса) мин^{-1} ; L_{hi} – число часов работы передачи с нагрузкой уровня i (ч), вызывающей напряжения σ_i в зубе.

Обозначим N_i – число циклов действия нагрузки уровня i , вызывающей усталостное разрушение зуба в соответствии с кривой усталости (рис. 2). Тогда степень полученных повреждений зуба (напри-

Санюкевич Федор Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» Брестского государственного технического университета.

Монтик Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация автомобилей» Брестского государственного технического университета.

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