

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ УПРОЧНЯЮЩИХ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ И КОМПОЗИЦИИ ПОКРЫТИЕ-ПОДЛОЖКА, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ

**А. Л. Голозубов**

*К. т. н., доцент, доцент кафедры инженерно-педагогического образования УО «Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина», Мозырь, Беларусь, e-mail : golozuboval@ya.ru*

### Реферат

Упрочнение контактирующих металлических поверхностей, работающих в условиях высоких контактных давлений часто встречающаяся в производстве задача. Высокие контактные давления встречаются при работе штамповой оснастки, в прессовых соединениях, парах трения и т. д.

В статье предложено использование технологии осаждения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий, осаждаемых из дуговой плазмы при атмосферном давлении, что позволяет улучшить эксплуатационные свойства упрочнённых поверхностей. Эффект упрочнения связан с несколькими аспектами: высокие физико-механические свойства, сплошность и низкий коэффициент трения тонкопленочного кремнийсодержащего покрытия; совместная работа покрытия и приповерхностного слоя подложки.

**Ключевые слова:** упрочнение, тонкопленочное кремнийсодержащее покрытие, дуговая плазма, микротвёрдость, высокие контактные давления.

## INVESTIGATION OF PROPERTIES OF PLASMA-CHEMICAL STRENGTHENING THIN-FILM SILICON-CONTAINING COATINGS AND COATING-SUBSTRATE COMPOSITIONS WORKING UNDER HIGH CONTACT PRESSURES

**A. L. Halazubau**

### Abstract

Hardening of contacting metal surfaces operating under conditions of high contact pressures is a common task in production. High contact pressures are encountered during the operation of die equipment, in press joints, friction pairs, etc.

The article proposes the use of technology for the deposition of thin-film silicon-containing coatings deposited from arc plasma at atmospheric pressure, which improves the performance properties of hardened surfaces. The hardening effect is associated with several aspects: - high physical and mechanical properties, continuity and low coefficient of friction of a thin-film silicon-containing coating; - joint operation of the coating and the near-surface layer of the substrate.

**Keywords:** hardening, thin-film silicon-containing coating, arc plasma, microhardness, high contact pressures.

### Введение

Защита металлических поверхностей от износа при действии высоких контактных давлений является важной наукоёмкой задачей, поэтому исследования в данной области актуальны для многих сфер современного производства. Образование на поверхности детали защитных покрытий – наиболее эффективное направление защиты от износа соприкасающихся поверхностей при действии высоких контактных давлений. Защитные упрочняющие покрытия изолируют контактирующие поверхности соприкасающихся деталей друг от друга и от промежуточных слоев, а также от действия окружающей среды, препятствуют возникновению явления схватывания и образования поверхностных окисных слоев, снижающих эксплуатационные свойства технологической оснастки. Наиболее рациональная область использования – упрочнение контактирующих поверхностей штамповой оснастки для разделительной штамповки, прецизионных узлов трения.

Работоспособность системы защитное покрытие-подложка зависит от свойств покрытия: сплошности (непроницаемости для агрессивных сред), прочности сцепления с металлом (адгезии), равномерности распределения по поверхности, жаростойкости, а также свойств подложки. Долговечность покрытий определяется длительностью сохранения толщины и свойств покрытия и связи его с подложкой.

Особенностью исследования физико-механических свойств тонкопленочных покрытий (ТП) в отличие от компактных массивных материалов является необходимость рассмотрения отдельных характеристик в тесной взаимосвязи, с учетом их взаимовлияния, что позволяет создать целостную картину их свойств.

### Исследование свойств упрочняющих ТП

Защитные свойства ТП определяется не столько абсолютными значениями отдельных характеристик, сколько их относительным взаимодействием и взаимовлиянием и во многом определяются соотношением между когезией и адгезией. Преобладание когезии над адгезией является причиной разрушения покрытий по адгезионному механизму – за счет отслаивания от подложки с потерей защитных свойств упрочняющих ТП. Превалирование адгезии может быть причиной разрушения по когезионному механизму за счет образования сетки трещин в ТП. Поэтому необходимо создавать рациональное сочетание адгезионных и когезионных свойств в системе покрытие-подложка. Основным доступным способом количественной и качественной оценки физико-механических свойств тонкопленочных покрытий является измерение твёрдости (микротвёрдости).

Одной из наиболее важных особенностей образования на металлических подложках упрочняющих износостойких ТП из дуговой плазмы при атмосферном давлении является высокая скорость охлаждения тонкопленочного покрытия и поверхностных слоев подложки в процессе нанесения ТП, достигающих  $10^5 - 10^6$  К/с. Наличие значительного градиента температур обусловлено малой толщиной ТП (0,3–1,5 мкм), невысокой эффективной мощностью дугового плазматрона, связанной с его конструктивными особенностями (плазматрон косвенного действия); циклическостью нанесения ТП, интенсивным теплоотводом от поверхностных слоев в глубину подложки. Конденсация из газовой фазы идёт по механизму паржидкость-аморфная фаза, что и определяет особенности строения упрочняющего кремнийсодержащего ТП [1,2].

В результате такого характера образования и роста получаемое покрытие имеет химический состав, отличный от стехиометрического, содержащий в своём составе оксиды, нитриды и карбиды кремния в различных процентных соотношениях, определяемых химическим элементарным составом реагентов плазменной струи. Высокие скорости охлаждения ТП способствуют аморфизации покрытия и образованию искаженной, фрагментированной структуры.

На установке ДРОН-3 образец снимается в Cu-K $\alpha$  монохроматизированном излучении в режиме сканирования с шагом 0,05 и с постоянной времени набора импульсов на точку  $t = 100$  с. Снимался диапазон углов, на котором должны были находиться линии от предполагаемых фаз: Si, SiC, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. В результате была зафиксирована линия с межплоскостным расстоянием  $d = 2,15$  (рисунок 1).

Из рассмотрения распределения интенсивности отражения следует: кривая имеет сглаженный вид, на ней отсутствуют дифракционные максимумы, характерные для веществ, имеющих кристаллическую решетку. Отсутствие пиков, принадлежащих SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC не говорит о том, что этих фаз нет в составе покрытия. Наблюдаемое распределение соответствует компактному веществу с ориентацией частиц без дальнего порядка. Таки образом, исследования фазового состава показали, что получаемые из дуговой плазмы ТП имеют аморфную (стеклообразную) структуру, характеризующуюся высокой степенью структурных несовершенств. В результате физико-механические свойства кремнийсодержащего ТП отличаются от свойств компактного материала в сторону их увеличения.

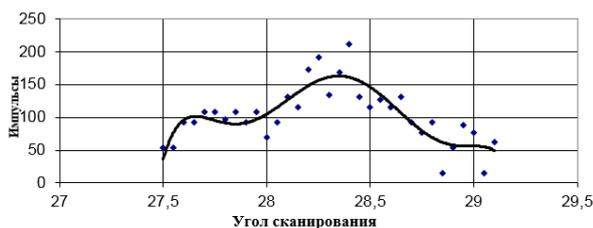


Рисунок 1 – Дифрактограмма фазового состава

Исследование фрагментов ТП, отделённого от подложки по оригинальной методике [3], показали, что покрытие является сплошным, однородным и без дефектов строения.

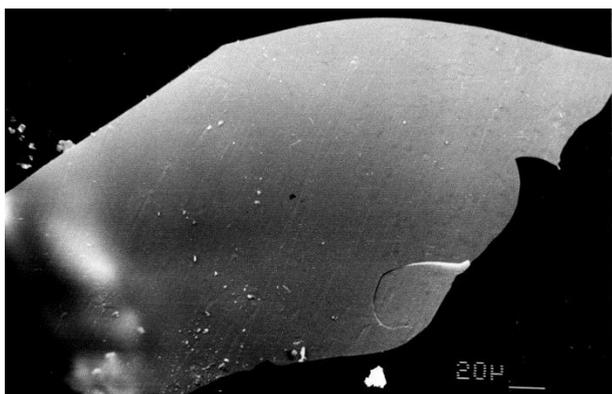


Рисунок 2 – Вид тонкоплёночного кремнийсодержащего покрытия, отделённого от подложки РЭМ Nanolab 7,  $\times 500$

При этом измеренная по интерференционной картине толщина ТП хорошо согласуется с данными электронной микроскопии и составляет от 0,3 до 1,5 мкм. (рисунок 2).

Исследования структуры упрочняющих ТП после воздействия высоких контактных давлений показали, что само ТП в результате такого рода воздействий не разрушается, т.е. отсутствует разрушение по компрессионному механизму. Это означает, что высокие удельные нагрузки передаются через более прочное ТП на подложку, которая под их действием начинает деформироваться сначала в упругой, а затем и в пластической стадии. Проведенные измерения

микротвердости на микротвердомере "Micromet-2" фирмы "Bullermet", бездефектных участков ТП после действия высоких контактных давлений, не показали существенной разницы с участками ТП на испытуемой подложке, не подвергавшихся действию высоких контактных давлений ( $H \mu^* = 20,0 - 24,8$  ГПа). Это означает, что изменение свойств композиции покрытие – подложка при действии высоких контактных давлений будет зависеть от изменения состояния приповерхностного слоя подложки, в результате протекания в нем процессов деформирования.

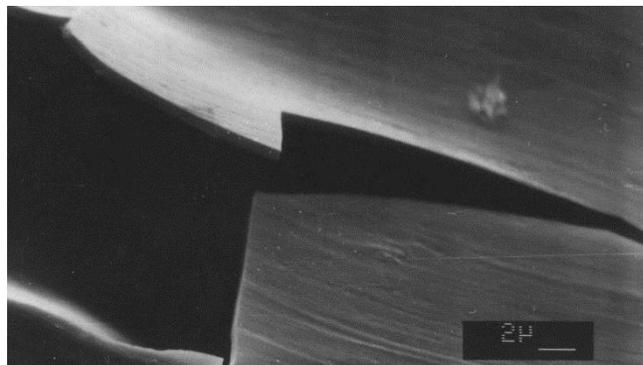


Рисунок 3 – Вид тонкоплёночного кремнийсодержащего покрытия, отделённого от подложки РЭМ Nanolab 7,  $\times 5000$

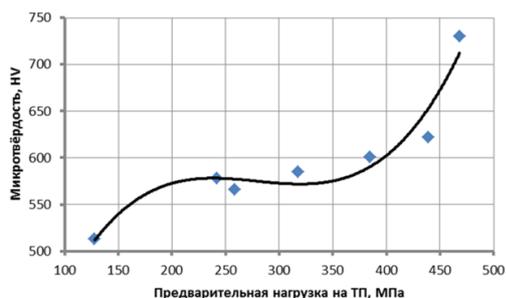
Поэтому измерение микротвердости композиции покрытие-подложка является более информативной качественной характеристикой и будет во многом зависеть от свойств подложки.

При работе штамповой оснастки одной из основных причин выхода из строя защитных покрытий является изнашивание их поверхности, которое может носить абразивный характер. Это происходит из-за случайного попадания различных абразивных частиц как извне, так и в составе технологической массы. Поэтому в этом случае основное внимание необходимо уделить разрушению ТП вследствие действия механизма поверхностного микрорезания. Оценка сопротивляемости материала микрорезанию можно проводить по результатам измерения микротвердости.

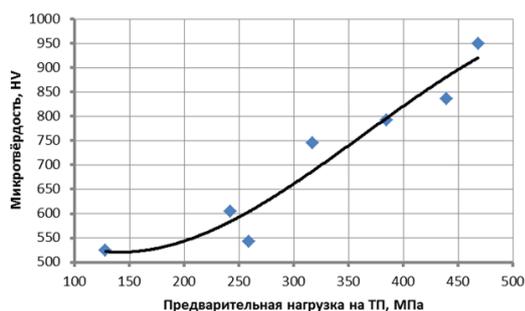
Правомерность оценки износостойкости по измеренной микротвердости вытекает из рассмотрения механизма износа. С точки зрения молекулярно-механической теории, наиболее полно учитывающей действие всех факторов, интенсивность износа в значительной степени зависит от твердости истираемой поверхности и наличия адгезионных связей между взаимодействующими поверхностями.

Увеличение твердости защитного покрытия приводит к изменению условий износа – уменьшению или полному исключению режима микрорезания. В этом случае обеспечивается оптимальный режим – упругое взаимодействие контактирующих поверхностей. Метод оценки прочностных свойств по измеренной микротвердости получил распространение также из-за относительной простоты и невысокой трудоемкости.

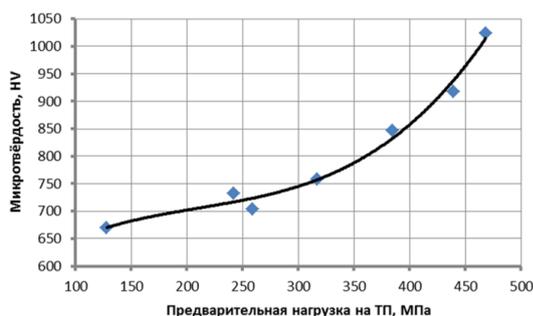
Измерения микротвердости композиции ТП – подложка проводились при разных нагрузках на индентор: 10, 50, 100 г на твердомере "Micromet-5100" Buehler. Такая методика измерения позволяет получить полную картину изменения свойств композиции ТП – подложка. Малая нагрузка на индентор предполагает, во-первых, незначительное внедрение индентора в подложку, что позволяет оценивать состояние тонких приповерхностных слоев подложки; а во-вторых, большее участие ТП в интегральной микротвердости композиции ТП–подложка. Большие нагрузки уменьшают влияние ТП на общую микротвердость и в основном показывают состояние приповерхностного (деформируемого) слоя подложки. Измерения микротвердости при различных нагрузках на индентор проводились в одинаковых условиях для обеспечения точности сравнительных исследований. Рассмотрение зависимостей микротвердости композиции ТП–подложка после предварительного воздействия высоких контактных давлений при разных нагрузках (рисунки 3–6) позволяет заключить следующее.



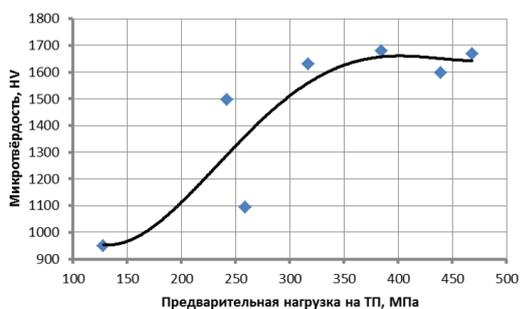
**Рисунок 4** – Микротвердость композиции ТП – подложка в зависимости от величины контактных давлений предварительного нагружения образцов, материал подложки У8А (52 HRCэ, закалка 790 °С, вода, отпуск 350 °С), индентор Виккерса, P = 10г, t = 12 с



**Рисунок 5** – Микротвердость композиции ТП – подложка в зависимости от величины контактных давлений предварительного нагружения образцов, материал подложки У8А (52 HRCэ, закалка 790 °С, вода, отпуск 350 °С), индентор Виккерса, P = 50г, t = 12 с



**Рисунок 6** – Микротвердость композиции ТП – подложка в зависимости от величины контактных давлений предварительного нагружения образцов, материал подложки У8А (52 HRCэ, закалка 790 °С, вода, отпуск 350 °С), индентор Виккерса, P = 100г, t = 12 с



**Рисунок 7** – Микротвердость композиции ТП – подложка в зависимости от величины контактных давлений предварительно нагруженного образца, материал подложки основа - ВСтЗсп, наплавленный наружный слой – сормайт (толщина 6 мм), дуговая наплавка (62 HRCэ), индентор Виккерса, P = 200г, t = 12с.

Для образцов из инструментальной стали У8А условно можно выделить два участка кривых, на которых поведение микротвёрдости имеет сходный характер. Вначале, при малых усилиях предварительного нагружения ТП, наблюдается снижение микротвердости, связанное с началом процессов пластического деформирования в приповерхностных слоях подложки.

На втором участке, при средних значениях предварительного нагружения ТП, начинается плавный рост микротвердости композиции ТП – подложка вызванный, вероятнее всего, эффектом упрочнения в результате значительного пластического деформирования приповерхностных слоев подложки.

Аналогичный эффект может быть достигнут и при меньших значениях величины пластической деформации в результате действия большого количества циклов нагружения (для оснастки вырубных штампов  $8 \cdot 10^3$  –  $50 \cdot 10^3$  ударов).

#### Заключение

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы.

Микротвердость упрочняющего кремнийсодержащего ТП после воздействия высоких контактных давлений не изменяется, т. к. ТП, имеющее более высокие физико-механические свойства, чем подложка, в процессе воздействия высоких контактных давлений является промежуточным слоем, через который передаются нагрузки непосредственно на поверхностные слои подложки, при этом отсутствует компрессионный механизм когезионного разрушения ТП.

Прочностные свойства композиции ТП – подложка определяются в основном состоянием приповерхностного слоя подложки, испытывающего упругие и пластические деформации в результате действия высоких контактных давлений.

Действие высоких контактных давлений, в пластической стадии деформирования подложки, вначале сопровождается незначительным снижением микротвердости композиции, упрочняющее ТП – подложка, а при дальнейшем увеличении контактных давлений – ростом микротвердости.

Упрочняющее ТП в условиях пластических и упругих деформаций не теряет защитных свойств, обеспечивая надёжную защиту контактирующих поверхностей оснастки за счёт их разделения и переводу режима износа из микрорезания в режим упругого взаимодействия.

Проведенные производственные испытания показали, что на упрочняемых поверхностях штамповой оснастки наблюдается сплошной износ упрочняющего ТП с отсутствием участков скалывания покрытия. Нанесение упрочняющего ТП позволило увеличить ресурс работы штампов для разделительной штамповки в 2,5–3 раза.

#### Список цитированных источников

1. Механизм формирования плазмохимических тонкопленочных покрытий, полученных из дуговой плазмы / А. Л. Голозубов // Сварка и родственные технологии 1: Респ. межвед. сб. науч. труд. БГНПК ПМ, НИКТИ СП. – Минск, 1999. – С. 70.
2. Технология тонких пленок. Справочник: В 2 т. / Под ред. Л. Майссела, Р. Гленга.-М.: Советское радио, 1977. – Т. 1. – 664 с.

#### References

1. Mechanizm formirovaniya plazmohimicheskikh tonkoplenochnykh pokrytij, poluchennyh iz dugovoj plazmy / A. L. Golozubov // Svarka i rodstvennye tekhnologii 1: Resp. mezhved. sb. nauch. trud. BGNPK PM, NIKTI SP. – Minsk, 1999. – S. 70.
2. Tekhnologiya tonkih plenok. Spravochnik: V 2 t. / Pod red. L. Majssela, R. Glenga.-M.: Sovetskoe radio, 1977. – T. 1. – 664 s.

Материал поступил 25.05.2023, одобрен 01.05.2023, принят к публикации 01.05.2023