

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.539.4

Е. Б. Сорока (г. Киев)

Обеспечение устойчивости PVD покрытий созданием дискретной топографии с задаваемыми параметрами

Показано, что в PVD покрытиях, для которых характерны значительные остаточные напряжения сжатия, предотвратить вспучивание покрытия с его последующим разрушением можно формированием покрытий дискретного типа с заданными параметрами. Предельно допустимая протяженность дискретного участка покрытия, при прочих равных условиях, будет различна на основах из разных материалов. Создание дискретной топографии повышает самоорганизацию системы основа—покрытие и расширяет возможности применения вакуум-плазменных покрытий.

Ключевые слова: PVD покрытия, напряжения сжатия, дискретная топография.

Введение. Необходимость защиты и упрочнения поверхности, даже при использовании конструкционных материалов с улучшенным комплексом физических и механических свойств, вытекает из того, что поверхностные слои нагруженных твердых тел являются самостоятельной подсистемой, в которой развиваются процессы, являющиеся синергетическим активатором процессов во всем объеме тела [1, 2].

Отсюда следует, что отказы изделий вследствие износа, коррозионных и эрозионных процессов, трещинообразования при различных видах эксплуатационного нагружения определяются свойствами относительно тонкого поверхностного слоя. Синергетический эффект при нанесении тонких покрытий обеспечивает достаточный уровень функциональных характеристик в необходимом масштабе путем объединения свойств двух и более материалов с получением композитов, обладающих характеристиками, которые не могут быть достигнуты при использовании одного материала [3].

Вместе с тем, поверхность со сплошным покрытием неизбежно разрушается путем растрескивания покрытия (когезионное разрушение) или отслоения по интерфейсу (адгезионное разрушение). Такое разрушение может наступать как под действием остаточных либо эксплуатационных напряжений, так и в результате их совместного действия. В итоге, подобно процессам в

живой природе, происходит самоорганизация новых, более устойчивых структур. Исходя из принципов самоорганизации, была предложена концепция создания композита с поверхностью, имеющей дискретную топографию, архитектура которой изначально подобна той, которая будет сформирована в результате приработки под действием остаточных напряжений и напряжений от эксплуатационного нагружения, например, от приложенной к основе растягивающей нагрузки [4—6]. Такой подход позволяет на проектировочном и технологическом уровне обеспечивать качество и эксплуатационные свойства изделия с покрытием.

Целью настоящей работы является обоснование концепции обеспечения прочности поверхности за счет формирования дискретной топографии, повышающей самоорганизацию системы основа—покрытие при наличии в ней остаточных напряжений.

Типичные виды разрушения в системе основа—покрытие от действия остаточных напряжений. Вид разрушения в системе основа—покрытие зависит от величины и знака остаточных напряжений [7].

В условиях действия растягивающих остаточных напряжений еще до начала эксплуатации изделия может наступить растрескивание покрытия (рис. 1, *a*), если величина остаточных напряжений растяжения $\sigma^{\text{ост}}$ больше, чем предел прочности на растяжение материала покрытия R_m :

$$\sigma^{\text{ост}} \geq R_m. \quad (1)$$

Напряжение растяжения в покрытии после образования трещин от действия остаточных напряжений растяжения $\sigma^{\text{ост}}$ определяют соотношением [7]

$$\sigma(z) = \sigma^{\text{ост}} [\text{th}(\beta\xi)\text{sh}(\beta z) - \text{ch}(\beta z) + 1], \quad (2)$$

где $\xi = \frac{L}{2}$ — половина расстояния между трещинами; β — постоянная, зависящая от упругих характеристик и толщины основы и покрытия.

Аналогичная формула для напряжений растяжения в переплавленном лазерным лучом поверхностном слое металлопорошкового покрытия, полученного электродуговым распылением, представлена в [8]:

$$\sigma(z) = \sigma^{\text{ост}} [1 - \text{ch}(kz - \xi)\text{sh}(k\xi)], \quad (3)$$

где $k = E_2(1 - \nu)/(E_1 h_1 h_2)$; $E_1, E_2, \nu_1 = \nu_2 = \nu, h_1, h_2$ — соответственно модули упругости первого рода, коэффициент Пуассона и толщина верхнего переплавленного слоя с остаточным напряжением растяжения (индекс 1) и нижнего слоя исходного напыленного слоя (индекс 2).

Там же получена формула для расчетного значения шага трещин, связывающих параметр L с действующими в слое остаточным напряжением $\sigma^{\text{ост}}$, пределом прочности слоя при растяжении R_m , а также упругими и геометрическими характеристиками:

$$L \leq \sqrt{8R_m E_1 h_1 h_2 (\sigma^{\text{ост}} E_2 (1 - \nu))^{-1}}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что с ростом остаточных напряжений $\sigma^{\text{ост}}$ шаг трещины уменьшается. Очевидно, исходя из принципа самоорганизации, можно создать поверхностный слой с исходной дискретной топографией, когда участок дискрета $D \leq L$.

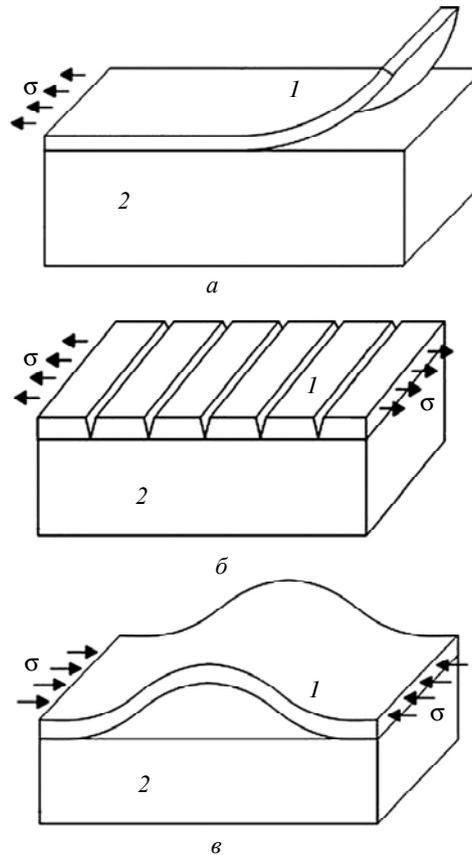


Рис. 1. Типы разрушения покрытия под воздействием остаточных напряжений (растяжения (а, б) и сжатия (в)): отслоение (а), растрескивание (б), вспучивание (в); 1 — покрытие, 2 — основа.

Напряжениям растяжения в покрытии $\sigma(z)$ соответствуют касательные напряжения $\tau(z)$ на интерфейсе:

$$\sigma(z) = \frac{1}{h_{\text{п}}} \int_0^z \tau(z) dz, \quad (5)$$

где $h_{\text{п}}$ — толщина покрытия; z — текущая координата вдоль продольной оси.

Отслоению покрытия от основы (см. рис. 1, а) соответствует превышение касательных максимальных напряжений τ_{max} величины прочности сцепления основы с покрытием $\tau_{\text{сц}}$:

$$\tau_{\text{max}} \geq \tau_{\text{сц}}. \quad (6)$$

При эксплуатации изделий с покрытиями наиболее благоприятной является ситуация, когда в покрытиях формируются остаточные напряжения сжатия. Значительный уровень остаточных напряжений сжатия присущ вакуум-плазменным покрытиям (PVD), которые благодаря высокой износо- и термостойкости широко применяют для повышения работоспособности режущего и деформирующего инструмента, а также деталей трибосопряжений [9, 10]. Применение сетчатых экранов позволяет получать вакуум-плазменные покрытия дискретного типа [11].

По данным [12—14] остаточные напряжения сжатия в покрытиях повышают предел текучести, пределы прочности при растяжении и изгибе его материала. С высоким уровнем остаточных напряжений сжатия в покрытиях связывают также повышение их трещино-, износо- и коррозионной стойкости [15—17]. Вместе с тем, остаточные напряжения сжатия, в зависимости от уровня, могут привести к вспучиванию покрытия с последующим растрескиванием (см. рис. 1, в). Исходя из значений прочности сцепления, во избежание разрушения отрывом и вспучиванием, в [18] предложено ограничивать величину остаточных напряжений сжатия в покрытии.

Считается, что вспучивание покрытия на плоской поверхности будет иметь место при наличии исходного местного нарушения адгезии покрытия с основой [7], когда напряжения сжатия достигают критической величины [19]:

$$\sigma_{\text{кр}}^{\text{ост}} = \frac{\pi^2 E_{\text{п}}}{3} \left(\frac{h_{\text{п}}}{l} \right)^2, \quad (7)$$

где l — протяженность участка покрытия; $E_{\text{п}}$ — модуль упругости первого рода материала покрытия.

Таким образом, логично найти максимально допустимую протяженность участка дискретного покрытия D , исходя из недопущения вспучивания (потери устойчивости) при действии остаточных напряжений сжатия в покрытии:

$$D = l \leq \frac{\pi}{h_{\text{п}}} \sqrt{\frac{E_{\text{п}}}{3\sigma_{\text{кр}}^{\text{ост}}}}. \quad (8)$$

Определение предельной протяженности участков PVD покрытий из условия отсутствия их вспучивания. Если исходить из значений $\sigma_{\text{кр}}^{\text{ост}}$, полученных экспериментально-расчетным методом гибкого образца для сплошных PVD покрытий TiN и TiAlN на стальной основе [20], можно определить предельные величины протяженности дискретных участков для различных толщин покрытий (рис. 2).

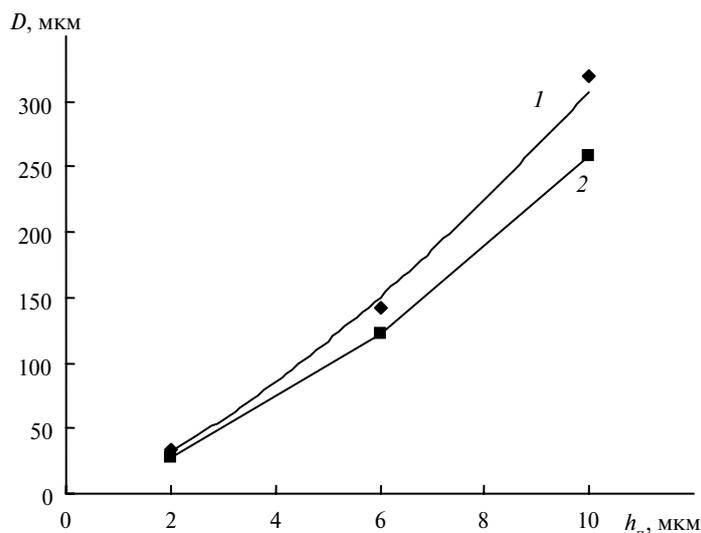


Рис. 2. Зависимость максимально допустимой протяженности дискретного участка покрытий TiN (1) и TiAlN (2) от толщины покрытия.

Общий уровень остаточных напряжений сжатия является алгебраической суммой структурной и термической составляющих. Наличие термической составляющей, обусловленной различием коэффициентов температурного расширения материалов основы α_0 и покрытия α_n (табл. 1), определяет различный уровень остаточных напряжений в покрытиях в целом [21].

Таблица 1. Коэффициенты температурного расширения материалов и соотношение коэффициентов температурного расширения материалов основы и покрытия TiAlN

Коэффициент температурного расширения	Материал основы				
	Р6М5	ТН-20	ВК8	силинит-Р	КНБ
$\alpha_0, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	10,4	8,5	5,5	3,8	2,55
α_n/α_0	0,67	0,81	1,26	1,83	2,72

По методике [22], исходя из экспериментально полученной величины остаточных напряжений для покрытия TiAlN ($7,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) на стальной основе, была рассчитана суммарная величина $\sigma^{\text{ост}}$ в том же покрытии для основ из различных материалов: быстрорежущей стали Р6М5, безвольфрамового твердого сплава ТН-20, вольфрамкобальтового твердого сплава ВК8, режущей керамики силинита-Р, поликристаллического сверхтвердого материала (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2. Суммарные остаточные напряжения и предельно допустимая величина протяженности дискретного участка для покрытия TiAlN различной толщины на основах из различных материалов

Материал основы	$\sigma^{\text{ост}}$, ГПа			D , мкм		
	для h , мкм			для h , мкм		
	2	6	10	2	6	10
Р6М5	-6,60	-3,20	-2	28	123	260
ТН-20	-5,29	-2,57	-1,34	32	140	318
ВК8	-5,05	-1,65	-0,42	33	173	570
Силинит-Р	-4,65	-1,26	-0,05	34	200	1600
КНБ	-4,27	-0,88	+0,35	35	236	—

Используя формулу (9) и полученные значения $\sigma^{\text{ост}}$, нашли предельно допустимую величину протяженности дискретного участка D для рассматриваемого покрытия, сформированного на основах из различных материалов (рис. 4).

Анализ полученных результатов показывает, что предельная протяженность устойчивого к вспучиванию участка того же покрытия возрастает с уменьшением остаточных напряжений сжатия и толщины покрытия (рис. 5). Устойчивость участка одного и того же покрытия с одинаковой толщиной зависит от материала основы и возрастает с увеличением α_n/α_0 . Следует также отметить, что с возрастанием толщины покрытия снижется не только суммарное значение остаточных напряжений, но и доля их структурной составляющей. Так, для достаточно большой (10 мкм) толщины покрытия на основе из силинита-Р общий уровень остаточных напряжений составляет

всего -50 МПа, в то время как для субстрата из ПСТМ на основе КНБ суммарные остаточные напряжения оказываются положительными и вопрос о разрушении покрытия вспучиванием отпадает.

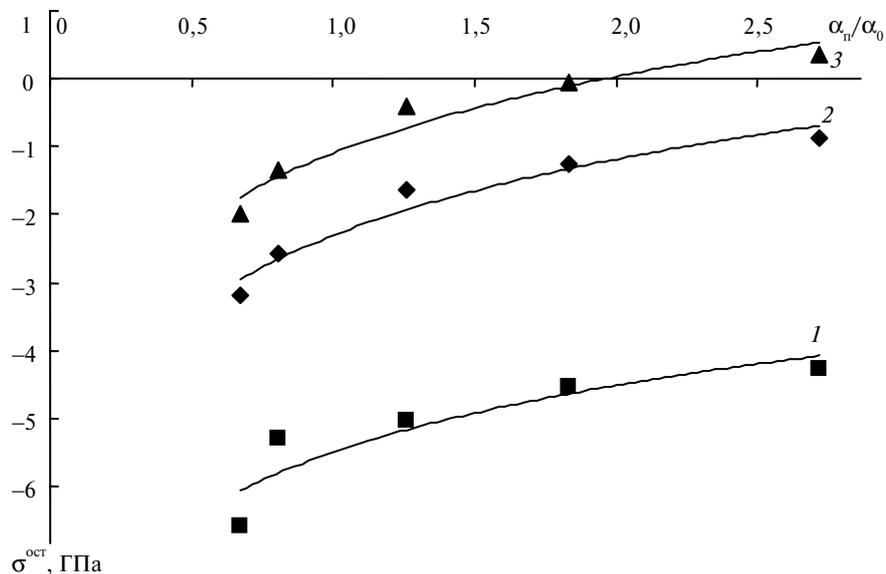


Рис. 3. Зависимость абсолютных значений суммарных остаточных напряжений сжатия в покрытии TiAlN толщиной 2 (1), 6 (2) и 10 (3) мкм от соотношения коэффициентов температурного расширения материалов основы и покрытия.

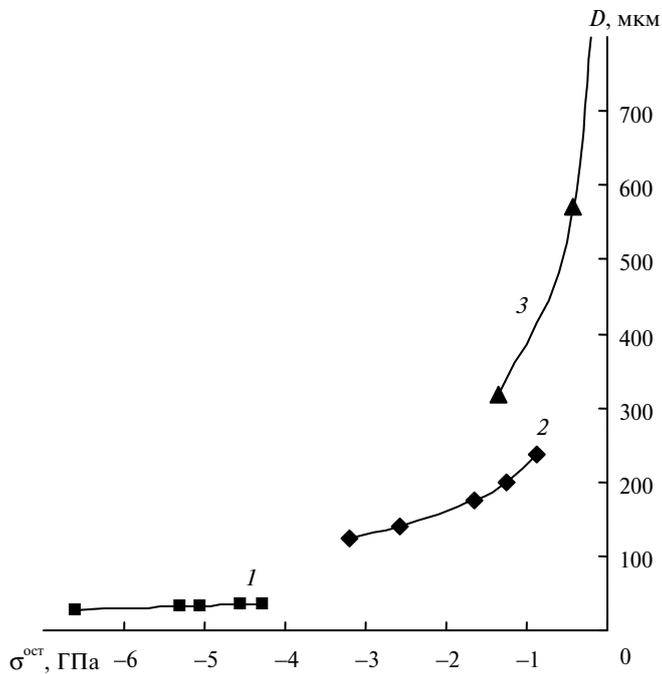


Рис. 4. Зависимость максимально допустимой протяженности дискретного участка покрытия TiAlN толщиной 2 (1), 6 (2) и 10 (3) мкм от абсолютных значений суммарных остаточных напряжений сжатия на основах из различных материалов.

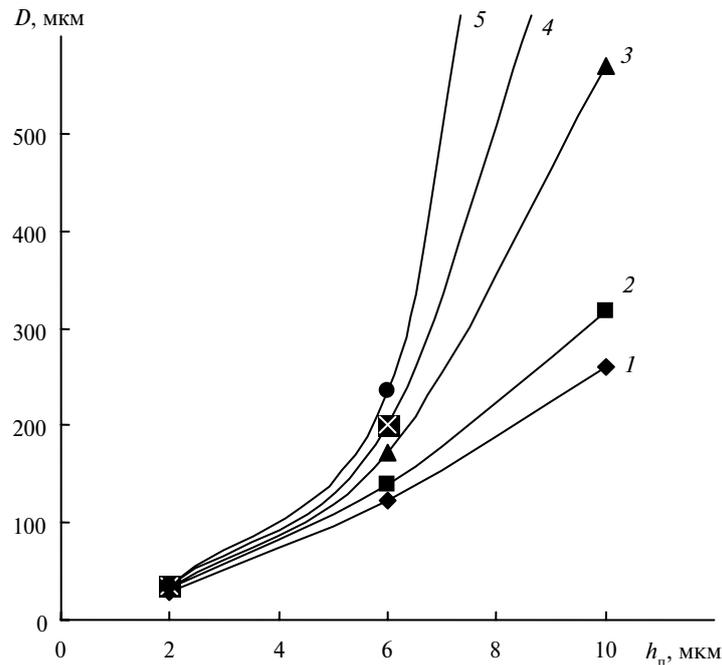


Рис. 5. Зависимость максимально допустимой протяженности дискретного участка покрытия TiAlN от толщины покрытия для основ из Р6М5 (1), ТН-20 (2), ВК8 (3), силинита-Р (4) и ПСТМ на основе КНБ (5).

Выводы

Показано, что покрытия, характеризующиеся высоким уровнем остаточных напряжений сжатия, могут разрушаться еще до начала их эксплуатации в результате вспучивания, приводящего к последующему разрушению поверхности.

Избежать такого вида разрушения можно путем формирования покрытий дискретного типа с заданными параметрами — ограничив протяженность дискретного участка и увеличив его толщину. Вместе с тем, толстые покрытия больше склонны к отслоению с образованием интерфейсной трещины, поэтому вопрос выбора толщины необходимо оптимизировать.

Ввиду наличия термической составляющей остаточных напряжений общий уровень остаточных напряжений сжатия в покрытии зависит от материала основы — предельно допустимая протяженность дискретного участка покрытия, при прочих равных условиях, будет различна на основах из различных материалов. Предельный размер участка минимален для основы из стали, возрастает для основы из твердых сплавов, керамики и максимален для ПСТМ на основе КНБ.

Создание покрытий с дискретной топографией с параметрами, позволяющими предотвратить потерю устойчивости элементом покрытия, а значит и вспучивание покрытия с последующим растрескиванием, повышает самоорганизацию системы и расширяет возможности применения вакуум-плазменных покрытий.

1. *Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах* / Под ред. В. Е. Панина. — Новосибирск: СО РАН, 2006. — 519 с.
2. *Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогов А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении.* — М.: Наука, 1994. — 383 с.

3. Бледнова Ж. М. Управление долговечностью материалов путем нанесения на поверхность самоорганизующихся покрытий с памятью формы // 5-й междунар. междисциплинар. симпозиум “Прикладная синергетика в нанотехнологиях”, 17–20 нояб. 2008 г.: Сб. тр. — М., 2008. — С. 78–82.
4. Ляшенко Б. А., Мовшович А. Я., Долматов А. И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры // Технологические системы. — 2001. — № 4 (10). — С. 17–25.
5. Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б., Рутковский А. В., Литинская Н. В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // Пробл. прочности. — 2002. — № 4. — С. 119–125.
6. Антонюк В. С., Сорока Е. Б. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2008. — № 8. — С. 8–13.
7. Teixeira V. Residual stress and cracking in thin PVD coatings // Vacuum. — 2002. — **64**, N 3–4. — С. 393–399.
8. Чекурін В. Ф., Похмурська Г. В. Математична модель розтріскування лазерно модифікованих металопорошкових покриттів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2004. — № 5. — С. 18–20.
9. Falub C. V., Karimi A., Ante M., Kalls W. Interdependence between stress and texture in arc evaporated Ti—Al—N thin films // Surf. Coat. Tech. — 2007. — **201**, N 12. — С. 5891–5898.
10. Внуков Ю. Н., Марков А. А., Лаврова Л. В., Бердышев Н. Ю. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Под общей ред. Ю. Н. Внукова. — Киев: Техника, 1992. — 143 с.
11. Соловых Е. К., Ляшенко Б. А., Рутковский А. В. и др. Технологическое обеспечение вакуум-плазменных покрытий дискретной структуры // Технологические системы. — 2007. — № 2. — С. 22–27.
12. Рутковский А. В., Ляшенко Б. А., Гопкало А. П., Сорока Е. Б. Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий // Пробл. прочности. — 1999. — № 6. — С. 123–127.
13. Kamachi K., Ito T., Yamamoto T. Residual stresses of chemical carbides, coated with TiN by CVD process and by PVD process // Int. Conf. “Residual Stresses in Science and Technology”, Garmisch-Partenkirchen, 1986. — Oberursel, 1987. — Vol. 1. — P. 479–483.
14. Quinto D. T., Santhanam A. T., Jindal P. C. Mechanical properties, structure and performance of chemically vapor-deposited and physically vapor-deposited coated carbide tools // Mat. Sci. Eng. — 1988. — **105–106**, Part 2. — P. 443–352.
15. Lamastra F. R., Leonardi F., Montanan R. et al. X-ray residual stress analysis on CrN/Cr/CrN multilayer PVD coatings deposited on different steel substrates // Surf. Coat. Tech. — 2006. — **200**, N 22–23. — P. 6172–6175.
16. Klocke F., Krig T. Coated tools for metal cutting — features and applications // CIRP Annals — Manufacturing Technology. — 1999. — **48**, N 2. — P. 515–525.
17. Табаков В. П., Смирнов М. Ю., Циркин А. В. Механизм разрушения износостойких покрытий режущего инструмента в процессе резания // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 6. — С. 41–45.
18. Ляшенко Б. А., Ришин В. В., Шаривкер С. Ю. и др. К анализу напряженного состояния покрытий // Жаростойкие и теплостойкие покрытия: Тр. 4-го Всесоюз. совещания. — Л.: Наука, 1969. — С. 454–456.
19. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. — М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1955. — 567 с.
20. Ляшенко Б. А., Антонюк В. С., Сорока Е. Б., Рутковский А. В. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях дискретной структуры // Сверхтв. материалы. — 2005. — № 2. — С. 72–75.
21. Сорока Е. Б., Копейкина М. Ю., Антонюк В. С., Клименко С. А. Остаточные напряжения в вакуум-плазменном покрытии (TiAl)N // Вісник ДДМА. — 2007. — № 3 (9). — С. 230–232.
22. Пат. 28383, Україна, МПК G01L 1/06. Спосіб визначення залишкових напружень в покриттях / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна. — Заявл. 04.07.2007; Оpubл. 10.12.2007, Бюл. № 20.