

# Исследование процессов обработки

УДК 621.9.01:621.793.7

**С. А. Клименко, Ю. А. Мельнийчук** (г. Киев)  
**Г. В. Встовский** (г. Москва)

## **Взаимосвязь параметров структуры, механических свойств напыленных материалов и стойкости инструмента при их обработке резанием**

*Представлены результаты фрактальных исследований структуры и свойств напыленных аморфно-кристаллических покрытий. Показана тесная корреляционная связь фрактальных параметров структуры и совокупности механических свойств материалов покрытий. Установлено, что стойкость режущих инструментов при обработке покрытий резанием в значительной степени определяется однородностью структуры и стабильностью механических свойств обрабатываемых материалов.*

***Ключевые слова:** структура материала, износостойкие покрытия, фракталы, фрактальная размерность, стойкость инструмента.*

В машиностроении повышение качества выпускаемой продукции связано прежде всего с необходимостью увеличения ресурса работы быстроизнашивающихся деталей [1]. Одним из наиболее перспективных путей повышения работоспособности и долговечности машин является поверхностное упрочнение нанесением защитных покрытий на детали, работающие в условиях повышенного трения и износа [2]. В мировой практике наблюдается тенденция к увеличению объемов нанесения защитных покрытий. По прогнозам на ближайшие годы темпы роста производства поверхностно-упрочненных металлических изделий будут опережать темпы роста производства металлов и сплавов.

Совершенствование материалов защитных покрытий и технологий их нанесения в промышленности во многом сдерживается недостатком технологических возможностей по механической обработке. Высокие механические свойства покрытий, неоднородность структуры (наличие твердых включений, хаотично расположенных в структуре материала, относительно высокая пористость) резко снижают их обрабатываемость резанием, затрудняют достижение требуемого по условиям эксплуатации состояния поверхностного слоя деталей, особенно при обработке лезвийным инструментом [3].

© С. А. КЛИМЕНКО, Ю. А. МЕЛЬНИЙЧУК, Г. В. ВСТОВСКИЙ, 2008

Разработка новых подходов и методов, позволяющих прогнозировать работоспособность режущих инструментов при обработке современных функциональных материалов, является актуальной задачей теории резания. Эффективность механической обработки во многом определяется структурой и свойствами материалов контактирующей пары — инструментального и обрабатываемого. Напыленные покрытия имеют комбинированную структуру с чередованием фрагментов различных размеров и формы. Интегральные свойства таких структур могут быть описаны различными методами. В то же время, использование традиционных методик зачастую не позволяет установить корректные зависимости между параметрами структуры и механическими свойствами неоднородных материалов.

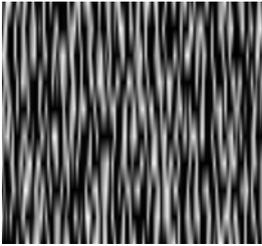
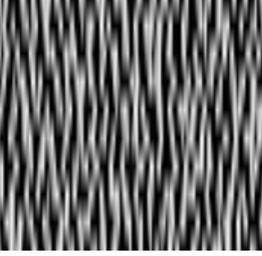
В данной работе на примере износостойких газотермических аморфизированных покрытий [4] высокой твердости, напыленных материалами на основе ферробора, с использованием фрактального подхода [5] исследована взаимосвязь структуры и механических свойств материалов покрытий, а также стойкости инструмента при их обработке резанием.

Методы газотермического напыления позволяют формировать на поверхностях деталей машин покрытия с разным уровнем механических и физико-химических свойств. В зависимости от технологического метода напыления и типа напыляемого материала (порошок, порошковая проволока, гибкий шнур) покрытия имеют различную структуру, которая и определяет их механические свойства.

Анализ микроструктуры напыленных покрытий из склонных к аморфизации материалов системы Fe—В показывает, что структура покрытий включает частицы дискообразной формы, поровое пространство между ними и отдельно затвердевшие напыленные частицы. В покрытиях имеются еще несколько структурных элементов, наличие которых связано с тем, что методами газотермического напыления не удается получить полностью (100 %-ное) аморфное покрытие [6]. Такие покрытия характеризуются присутствием кристаллических частиц, которые были расплавлены и затвердели после столкновения с основой. В покрытии они имеют сферическую форму с объемом близким к объему исходных частиц порошка. Основу покрытий составляют дискообразные аморфные и аморфно-кристаллические частицы, которые при напылении были расплавлены, сильно деформировались при соударении с подложкой и затвердели за очень короткий интервал времени. В таких частицах в разных концентрациях присутствуют кристаллические фазы  $\alpha$ -Fe, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>B, возникающие в связи с тем, что скорость охлаждения при напылении недостаточна для полного торможения процесса кристаллизации [7]. Из-за разбрызгивания напыляемых частиц при деформации на подложке в покрытии содержится незначительное количество мелких фрагментов округленной формы размером < 10 мкм. В структуре реального покрытия имеются частицы и промежуточных типов.

Покрытия, которые формируются в процессе напыления, в зависимости от вида, характеристик напыляемого материала и условий напыления, имеют разную микроструктуру (табл. 1). Общим для них является наличие аморфных (светлые фрагменты на изображениях в колонке 2 табл. 1) и кристаллических (темные фрагменты) фаз, которые отличаются по свойствам, в частности, микротвердости, а также присутствие значительного количества составляющих, что свидетельствует о структурной неоднородности напыленных покрытий этого класса.

**Таблица 1. Структура напыленных покрытий (x400) и визуализированная совокупность механических свойств их поверхностного слоя**

Тип покрытия	Микроструктура покрытия	Изображение совокупности механических свойств покрытий
Газопламенное из порошка $Fe_{80}B_{20}$		
Газопламенное из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$		
Электродуговое из порошковой проволоки $Fe_{79}Cr_{16}B_5$		

Учитывая, что структура обрабатываемого материала представлена несколькими случайным образом располагающимися составляющими, совокупность его механических свойств может рассматриваться как мультифрактал с комплексом характеристик. В настоящей работе были использованы более простые характеристики — размерность Хаусдорфа-Безиковича (в дальнейшем — фрактальная размерность) структуры  $D_{0стр}$  и совокупности механических свойств поверхностного слоя  $D_{0св}$  материалов покрытий.

Фрактальные характеристики, как правило, определяют по информации, содержащейся на геометрическом носителе [8]. В связи с этим фрактальный анализ структуры материалов проводят по фотографиям шлифов, а для визуализации совокупности механических свойств поверхностного слоя материалов покрытий (см. колонку 3 табл. 1) разработана специальная методика.

Для получения исходных данных по совокупности механических свойств материалов поверхностного слоя покрытий были использованы основы одного из методов микромеханических неразрушающих испытаний — деформационно-спектрального анализа [9], который базируется на явлении структурной чувствительности трибоспектральных характеристик, связанных с неоднородностью структуры гетерогенного поверхностного слоя. На приборе для проведения склерометрических исследований было проведено сканирование

поверхности образцов из исследуемых материалов. В покрытие внедряли алмазный индентор и с постоянной скоростью в режиме упруго-пластического деформирования перемещали его относительно образца. Конструкция склерометра исключала перемещение индентора в двух плоскостях, единственная плоскость перемещения — горизонтальная, а фиксируемое усилие — тангенциальное [10]. Склерометр позволяет снимать с исследуемой поверхности трибограмму, характеризующую изменение величины тангенциальной составляющей силы контактного взаимодействия индентора с поверхностью, набор ординат с пиковой амплитудой которой определяется совокупностью механических свойств материала и особенностями его структуры. В частности, пиковые значения ординат трибограммы тесно связаны с микротвердостью исследуемого материала вдоль трассы сканирования, а расстояние между пиками — с размером его структурных составляющих.

Трибограмма является геометрическим образом совокупности механических свойств гетерогенного поверхностного слоя покрытия вдоль трассы сканирования. Ее анализ, с учетом фрактальных представлений о структуре материала [5], позволяет выполнить оценку гетерогенности покрытия количественными характеристиками.

По полученным трибограммам клеточным методом [8] определяли фрактальную размерность совокупности механических свойств материала  $D_{0s}$  вдоль трассы сканирования.

Показатель степени в логарифмической зависимости числа клеток  $N$  от их размера  $\delta$  является фрактальной характеристикой множества (табл. 2). Такая зависимость представляет собой прямую — фрактальную диаграмму, тангенс угла  $\alpha$  наклона которой соответствует величине фрактальной размерности  $D_{0s}$ . На рис. 1 представлена вышеуказанная зависимость для покрытий систем Fe—Si—В и Fe—Cr—В. Подобная зависимость для покрытий системы Fe—В приведена в [5].

Аналогичным образом при послойном удалении покрытия были прослежены изменения их свойств по толщине.

**Таблица 2. Фрактальная размерность  $D_{0s}$  покрытий**

Тип покрытия	Функция $N = a\delta^{-D}$	$\alpha$ , град	Фрактальная размерность $D_{0s}$
Газопламенное из порошка Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	$N = 2145,9\delta^{-1,7624}$	60,4	1,76±0,04
Электродуговое из порошковой проволоки Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	$N = 1389,0\delta^{-1,5716}$	57,5	1,57±0,02
Газопламенное из порошковой проволоки Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	$N = 486,6\delta^{-1,3159}$	52,9	1,32±0,01
Газопламенное из порошка Fe <sub>79</sub> Cr <sub>16</sub> B <sub>5</sub>	$N = 2462,4\delta^{-1,8211}$	61,2	1,82±0,04
Электродуговое из порошковой проволоки Fe <sub>79</sub> Cr <sub>16</sub> B <sub>5</sub>	$N = 1809,9\delta^{-1,6821}$	59,2	1,68±0,03
Газопламенное из порошка Fe <sub>78</sub> Si <sub>12</sub> B <sub>10</sub> на расстоянии от основы, мм:			
0,6	$N = 425,1\delta^{-1,3136}$	52,6	1,31±0,02
1,1	$N = 946,4\delta^{-1,5805}$	57,7	1,58±0,02
1,4	$N = 1171,2\delta^{-1,6691}$	59,1	1,67±0,02

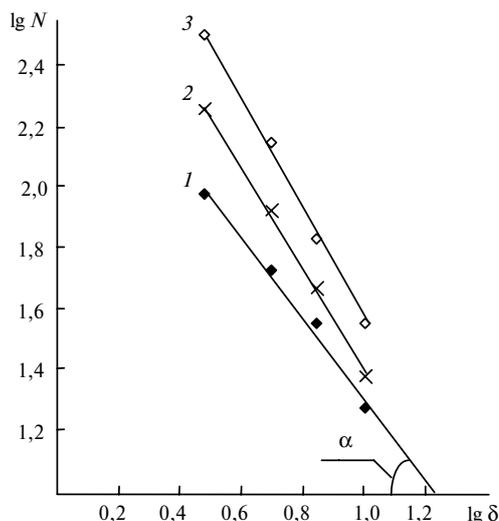


Рис. 1. Прямые для определения фрактальной размерности  $D_{0s}$  покрытий систем Fe—Si—B и Fe—Cr—B: 1 — газопламенное порошковое  $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ ; 2 — электродуговое порошковое  $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ; 3 — газопламенное порошковое  $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ .

Для расчета фрактальной размерности  $D_{0s}$  на ПЭВМ по приведенному выше алгоритму разработана программа Fractal analysis [11].

Средние значения величины фрактальной размерности  $D_{0s}$  для ряда покрытий приведены в табл. 2.

Дробная величина параметра  $D_{0s}$  подтверждает фрактальный характер совокупности механических свойств исследуемых покрытий вдоль трассы сканирования индентором.

Для определения совокупности механических свойств поверхностного слоя покрытий с образцов в параллельных сечениях с шагом 0,5 мм снимали десять трибограмм. Для визуализации совокупности механических свойств покрытий разработана специальная программа

Surface analysis [10], которая оцифровывает результаты и формирует двухмерные изображения (см. табл. 1), характеризующие совокупность механических свойств поверхностных слоев покрытий, что позволяет проводить количественную оценку неоднородности материала на всей исследованной поверхности.

Полученные изображения структур и совокупности механических свойств поверхностного слоя покрытий обрабатывали с использованием методики цифровой мультифрактальной параметризации и специальной компьютерной программы MFRDrom, разработанных Г. В. Встовским [12] (табл. 3).

**Таблица 3. Основные мультифрактальные характеристики структур и совокупности механических свойств покрытий**

Параметры	Покрытие					
	газопламенное порошковое $Fe_{80}B_{20}$		газопламенное из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$		электродуговое из порошковой проволоки $Fe_{79}Cr_{16}B_5$	
	структура	свойства	структура	свойства	структура	свойства
$D_1 - D_{40}$	-0,114	-0,147	-0,222	-0,188	-0,151	-0,191
$F_{40}$	2,889	3,157	3,167	3,235	3,129	3,429
$D_{-40} - D_{40}$	-0,702	-0,75	-1,851	-1,507	-1,854	-1,245
$D_{-40}$	1,273	1,227	0,124	0,449	0,121	0,715
$D_0$	1,845	1,825	1,656	1,693	1,789	1,753
$D_1$	1,861	1,83	1,753	1,763	1,824	1,769
$D_2$	1,876	1,841	1,80	1,794	1,842	1,787
$D_{40}$	1,975	1,977	1,975	1,951	1,975	1,960

Как видно из полученных результатов, наиболее перспективными с точки зрения установления взаимосвязи между фрактальными параметрами, харак-

теризующими структуру и механические свойства напыленных материалов, является фрактальная размерность  $D_0$  и показатель скрытой упорядоченности [12]  $\Delta_q = D_1 - D_q$ , где  $D_1$  — информационная размерность, характеризующая скорость роста информации;  $D_q$  — обобщенная энтропия (размерности) Ренне.

Анализ полученных результатов показывает, что для исследуемых покрытий увеличению фрактальной размерности  $D_{0\text{св}}$ , определенной с помощью мультифрактального анализа с использованием программы MFRDrom, соответствует увеличение фрактальной размерности  $D_{0\text{с}}$ , определенной клеточным методом (рис. 2). Связь между  $D_{0\text{с}}$  и  $D_{0\text{св}}$  может быть охарактеризована линейной зависимостью  $D_{0\text{с}} = -4,14 + 3,26D_{0\text{св}}$  (коэффициент корреляции 0,92), что подтверждает достоверность результатов оценки фрактальных параметров, полученных различными методами.

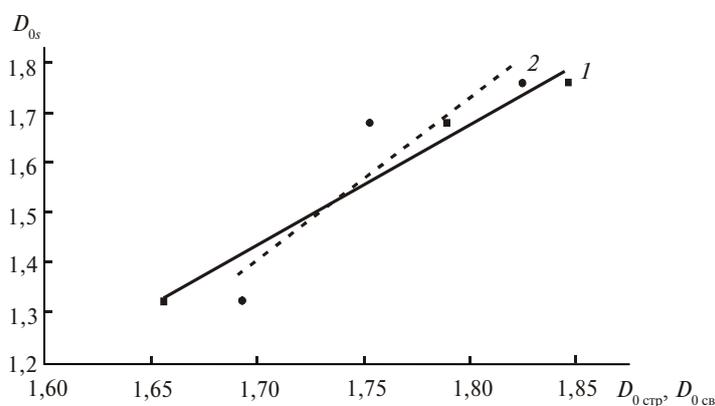


Рис. 2. Зависимости между фрактальными параметрами:  $D_{0\text{с}} = f(D_{0\text{стр}})$  (1),  $D_{0\text{с}} = f(D_{0\text{св}})$  (2).

Между величинами фрактальной размерности  $D_{0\text{с}}$ , фрактальной размерности  $D_{0\text{стр}}$  и величиной  $\Delta_{40\text{стр}} = (D_1 - D_{40})_{\text{стр}}$ , характеризующей скрытую упорядоченность структуры материалов, получены регрессионные зависимости (коэффициент корреляции 0,99):

$$D_{0\text{с}} = -2,64 + 2,4D_{0\text{стр}};$$

$$D_{0\text{с}} = 2,27 - 4,21\Delta_{40\text{стр}}.$$

Приведенные выражения количественно подтверждают связь между характеристиками структуры и свойств материалов напыленных покрытий.

Гетерогенность структуры и нестабильность механических свойств покрытий оказывают решающее влияние на интенсивность изнашивания режущего инструмента [13].

Представляет интерес сравнение стойкости инструмента при обработке резанием покрытий с различным содержанием аморфной фазы и, соответственно, характеризующихся различными значениями фрактальных размерностей  $D_{0\text{стр}}$  и  $D_{0\text{с}}$ . Полученные результаты показывают, что с увеличением гетерогенности структуры покрытий стойкость инструмента снижается, что, вероятно, связано с повышением нестабильности процесса резания и ростом динамических нагрузок. Относительно высокую стойкость инструмент имеет при точении газопламенного покрытия из порошковой проволоки  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ , которое характеризуется высоким (80—90 %) содержанием аморфной фазы

и, как следствие, более однородной структурой ( $D_{0\text{стр}} = 1,66$ ) и свойствами ( $D_{0s} = 1,32$ ).

При увеличении скорости резания наблюдается снижение влияния неоднородности материала на стойкость инструмента. Так, стойкость резцов (критическая величина износа  $h_3 = 0,4$  мм) при точении покрытий со скоростью резания  $v = 2$  м/с ( $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,2$  мм) для электродугового покрытия из порошковой проволоки  $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$  ( $D_{0s} = 1,68$ ) составляет 26 мин, для газопламенного покрытия из порошка  $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$  ( $D_{0s} = 1,82$ ) — 24 мин, а при скорости резания  $v = 1,2$  м/с — 44 и 36 мин соответственно.

Аналогичные результаты имеют место и при снижении критической величины износа инструмента (рис. 3).

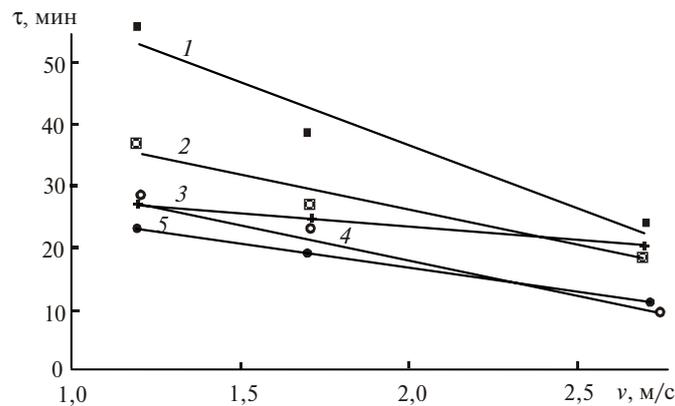


Рис. 3. Зависимость стойкости инструмента ( $h_3 = 0,25$  мм) от скорости резания ( $S = 0,05$  мм/об;  $t = 0,2$  мм,  $\gamma = -10^\circ$ ) при точении покрытий: 1 — газопламенного из порошковой проволоки  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$  ( $D_{0\text{стр}} = 1,66$ ,  $D_{0s} = 1,32$ ); 2 — электродугового из порошковой проволоки  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$  ( $D_{0\text{стр}} = 1,76$ ,  $D_{0s} = 1,57$ ); 3 — газопламенного из порошка  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$  ( $D_{0\text{стр}} = 1,82$ ,  $D_{0s} = 1,76$ ); 4 — электродугового из порошковой проволоки  $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$  ( $D_{0\text{стр}} = 1,78$ ,  $D_{0s} = 1,68$ ); 5 — газопламенного из порошка  $\text{Fe}_{79}\text{Cr}_{16}\text{B}_5$  ( $D_{0\text{стр}} = 1,77$ ,  $D_{0s} = 1,67$ ).

При обработке покрытий в зависимости от скорости резания изменяется динамический характер взаимодействия инструмента с напыленным материалом. В то же время, при одинаковых режимах резания с ростом гетерогенности материала увеличивается интенсивность ударных нагрузок на инструмент, что обусловлено присутствием значительного количества структурных составляющих и случайным характером их расположения в материале покрытия.

При обработке с небольшими скоростями резания покрытий, характеризующихся высокой гетерогенностью материала, на инструмент действуют ударные нагрузки с высокой интенсивностью, что снижает его стойкость. В случае обработки высокоаморфизированных покрытий с меньшей неоднородностью структуры и свойств соударение поверхности инструмента со структурными составляющими обрабатываемого материала происходит менее интенсивно и не оказывает существенного влияния на стойкость инструмента. С повышением скорости резания частота соударений возрастает, что интенсифицирует процесс изнашивания инструмента. В то же время, такое влияние условий нагружения инструмента частично компенсируется изменением условий контактирования между инструментальным и обрабатываемым материалами, при которых снижаются силы трения, что приводит к уменьшению вибраций инструмента. Условия резания высокогетерогенных мате-

риалов приближаются к условиям обработки монолитных и это положительно сказывается на стойкости инструмента.

Таким образом, процесс точения покрытий с более гетерогенной структурой целесообразно проводить с высокими скоростями резания, что, повышая производительность процесса обработки, способствует снижению ее себестоимости.

На рис. 4 представлена зависимость стойкости инструмента от величины фрактальной размерности  $D_{0s}$  напыленных покрытий системы Fe—В, показывающая, что гетерогенность структуры, нестабильность механических свойств напыленных покрытий оказывают существенное влияние на интенсивность изнашивания и стойкость режущего инструмента. Обработка резанием напыленного материала, характеризующегося повышенной величиной  $D_{0s}$ , сопровождается ускоренным изнашиванием режущего инструмента.

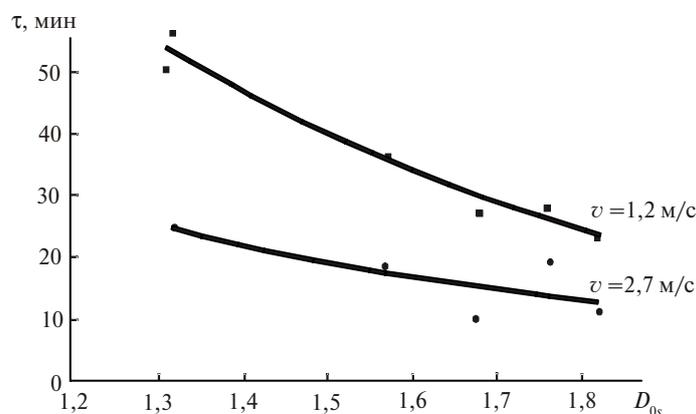


Рис. 4. Зависимость стойкости инструмента ( $h_3 = 0,25$  мм) от величины фрактальной размерности  $D_{0s}$  при точении ( $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,2$  мм) покрытий с аморфно-кристаллической структурой.

### Выводы

Фрактальный анализ является эффективным аппаратом диагностирования структуры и свойств материалов покрытий. С коэффициентом корреляции 0,92 установлены функциональные зависимости между фрактальными характеристиками структуры и совокупностью механических свойств поверхностного слоя аморфно-кристаллических газотермических покрытий.

Установлено, что интенсивность изнашивания режущего инструмента в значительной мере определяется однородностью структуры и свойств обрабатываемого материала. Повышение степени гетерогенности материала покрытий приводит к ускоренному изнашиванию инструмента, что связано, прежде всего, с интенсификацией ударных нагрузок на лезвие инструмента и ростом нестабильности процесса резания. Установлено, что с ростом скорости резания влияние неоднородности структуры и свойств покрытия на стойкость инструмента снижается.

Полученные результаты показывают перспективность использования количественных фрактальных характеристик и фрактального анализа для оценки стойкости режущего инструмента при обработке напыленных покрытий.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (договор № Ф 14/252—2007).

1. *Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др.* Технологические основы управления качеством машин. — М.: Машиностроение, 2003. — 256 с.
2. *Ляшенко Б. А., Клименко С. А.* Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине // *Сучасне машинобудування*. — 1999. — № 1 (1). — С. 94—104.
3. *Клименко С. А., Муковоз Ю. А., Полонский Л. Г., Мельничук П. П.* Точение износостойких защитных покрытий. — Киев: Техніка, 1997. — 144 с.
4. *Куницкий Ю. А., Коржик В. Н., Борисов Ю. С.* Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике. — Киев: Техніка, 1988. — 198 с.
5. *Клименко С. А., Мельничук Ю. А.* Фрактальный подход к изучению обрабатываемости резанием защитных покрытий // *Сверхтв. материалы*. — 2003. — № 3. — С. 46—53.
6. *Коржик В. М.* Наукові та технологічні основи газотермічного напилення аморфізованих покриттів з металевих сплавів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Київ, 1999. — 35 с.
7. *Манохин А. И., Митин Б. С., Васильев В. А., Ревякин А. В.* Аморфные сплавы. — М.: Металлургия, 1984. — 160 с.
8. *Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. — М.: Наука, 1994. — 384 с.
9. *Запорожец В. В.* Динамические характеристики прочности поверхностных слоев и их оценка // *Трение и износ*. — 1990. — 1, № 4. — С. 602—609.
10. *Клименко С. А., Мельничук Ю. А.* Комплекс обладнання для дослідження стану поверхневого шару матеріалів // *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Ялта, 26—28 сент. 2006 г.* — Киев: АТМ Украины, 2006. — С. 65—67.
11. *Клименко С. А., Щербаков А. В., Мельничук Ю. А.* Фрактальная оценка механических свойств материалов // *Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы 8-го Междунар. семинара, Ялта, сент. 2000 г.* — Киев: АТМ Украины, 2000. — С. 33—35.
12. *Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Бунин И. Ж.* Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. — Ижевск: Изд. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. — 116 с.
13. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля.* — Т. 5: *Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко.* — Киев, 2006. — 316 с.

Ин-т сверхтвердых материалов  
им. В. Н. Бакуля НАН Украины  
Всероссийский научно-исследовательский  
и проектно-конструкторский институт  
атомного материаловедения

Поступила 09.11.07