

С.А. Клименко, д.т.н.
Ю.О. Мельничук, аспір.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ПРИ ТОЧІННІ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ АМОРФНО-КРИСТАЛІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ

Представлені результати експериментальних досліджень шорсткості обробленої поверхні при точінні покриттів із аморфно-кристалічною структурою інструментом з полікристалів киборита. Показаний вплив величини фрактальної розмірності сукупності механічних властивостей матеріалу, яка кількісно характеризує структуру покриття, на шорсткість поверхні. Наведені залежності висоти мікронерівностей від умов процесу точіння.

Розвиток машинобудування пов'язаний з необхідністю забезпечення економного використання дефіцитних і високовартісних матеріалів, з одного боку, та підвищенням надійності і довговічності машин та механізмів, – з іншого. Особливо важливого значення набув розвиток технологій поверхневого зміцнення деталей, що підвищує їх зносостійкість, корозійну стійкість та інші важливі експлуатаційні властивості, забезпечує значне підвищення працездатності машин і механізмів. Газотермічне напилення покриттів (ГТП) порошковими матеріалами – один із широко розповсюджених у машинобудуванні способів. Новим напрямком у розвитку методів ГТП є використання матеріалів, що схильні до аморфізації. Покриття з таких порошоків характеризуються високим вмістом аморфної фази і, як наслідок, підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

Проте використання таких покриттів на деталях із високою розмірною точністю та вимогами до якості поверхні обмежується через недостатнє вивчення процесів їх механічної обробки. Існуюча практика обробки покриттів із аморфно-кристалічною структурою (ПАКС) переважно базується на використанні абразивних і фізико-технічних методів обробки. З метою розширення сфери використання ПАКС особливо актуальною є оцінка можливостей застосування процесу точіння із формування стану поверхневого шару і, зокрема, шорсткості обробленої поверхні, у зв'язку з тим, що більшість експлуатаційних властивостей деталей машин і, як наслідок, їх надійність та довговічність значною мірою визначаються шорсткістю їх поверхонь.

В цій роботі досліджена оброблюваність покриттів з порошкових матеріалів систем Fe–B, Fe–Si–B, Fe–Cr–B, які наносились на сталеву основу високошвидкісним газополуменим та надзвуковим електродуговим методами. Результати рентгеноструктурних досліджень, які проводились на рентгенівському дифрактометрі ДРОН – 3,0 в $Co_{K\alpha}$ – випромінюванні наведених типів покриттів свідчать про присутність в їх структурі аморфної складової.

Однією з основних умов отримання напилених деталей з високими експлуатаційними властивостями є вибір оптимального припуску під механічну обробку. Величина оптимального припуску при точінні покриттів функціонально залежить від товщини нанесеного матеріалу. В залежності від товщини покриття найбільш високими та стабільними властивостями характеризується часток покриття з товщиною 0,3–0,8 мм від основи, який і має найкращі експлуатаційні показники. У зв'язку з тим, що напилені покриття характеризуються неоднаковими властивостями за товщиною, процес точіння повинен проводитись так, щоб із виробу знімався найбільш дефектний матеріал, а до оброблюваної поверхні прилягали найбільш тверді, міцні та однорідні шари покриття. На рис. 1 наведені залежності зміни мікротвердості та кількості аморфної фази відповідно від зміни глибини покриття. Для отримання обробленої поверхні високої якості необхідно враховувати, що шорсткість поверхні після обробки залежить від рівня її розташування в шарі покриття. На рис. 2 показана зміна висоти нерівностей в залежності від товщини шару досліджуваних покриттів. Для оцінки шорсткості поверхні проводилось пошарове видалення точінням шарів покриття з наступним вимірюванням необхідних параметрів після кожного проходу інструмента. Вміст аморфної фази (АФ) досліджуваних покриттів визначали за методикою Б.К. Ванштейна [1]. Заміри параметрів шорсткості поверхні проводились профілографом-профілометром “Talysurf-5” фірми

“Renk Taylor-Hobson” (Великобританія). Через те, що висотні параметри шорсткості мають тісний кореляційний зв'язок, який близький до функціонального, в цій роботі досліджений вплив умов обробки на величину середнього арифметичного відхилення профілю R_a .

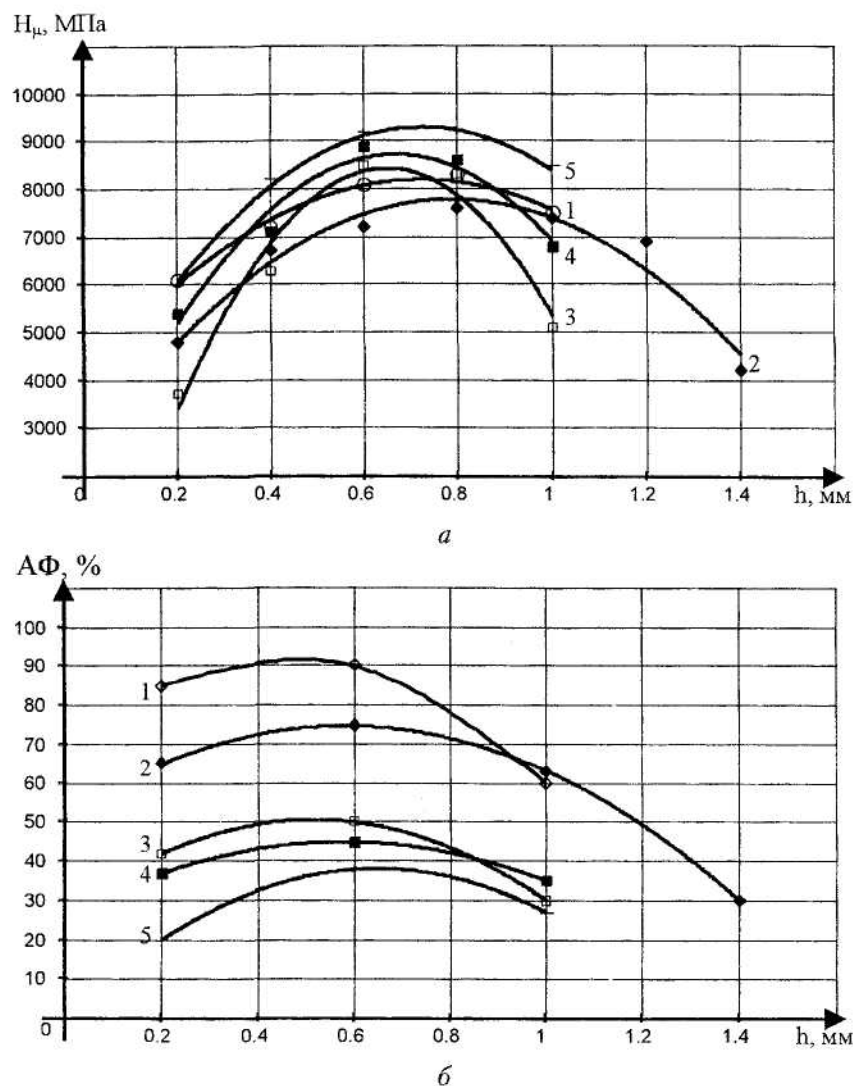


Рис. 1. Розподіл мікротвердості (а) та кількості аморфної фази (б) за глибиною покриття: 1 – газополуменеве покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$; 2 – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$; 3 – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{80}B_{20}$; 4 – електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$; 5 – електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{79}Cr_{16}B_5$

Оброблюваність різанням, здебільшого, визначається вихідною структурою та механічними властивостями матеріалів. Напилені покриття характеризуються нестабільністю фізико-механічних властивостей, пористістю, присутністю мікродефектів, які виникають у результаті газовиділення, кристалізації частинок та виплеску матеріалу покриття під час удару частинок у основу, зниженою міцністю зчеплення на межах між частинками і шарами, яка обумовлена неповним схопленням. В газотермічних покриттях із квазіаморфною структурою можна виділити декілька структурних елементів, утворення яких обумовлене тим фактом, що методами ГТНП не вдається отримати повністю аморфного покриття. Структура ПАКС схематично показана на рис. 3. Покриття, які формуються в процесі напилення залежно від виду і характеристики матеріалу для напилення та умов напилення, мають різну структуру. На рис. 4 представлені мікроструктури досліджуваних покриттів, які характеризуються поєднанням аморфних (світлих, що не травляться) і кристалічних (темних) областей, які мають різні властивості, зокрема, мікротвердість. У зв'язку з тим, що сукупність механічних

властивостей покриття при виготовленні та відновленні деталей здійснює безпосередній вплив на якість обробленої поверхні та стійкість інструмента, актуальним є завдання її кількісної оцінки. Для цього використовувався один із методів мікромеханічних неруйнівних досліджень – деформаційно-спектральний аналіз [2], який ґрунтується на явищах структурної чуттєвості трибоспектральних характеристик, що пов'язані з неоднорідністю гетерогенного поверхневого шару, що визначає спектральний характер формування сил тертя у зв'язку з немонотонним розповсюдженням пружно-пластичних деформацій через структурні бар'єри під час контактної взаємодії. Конструкція склерометра [3], який використовувався для проведення досліджень, виключає переміщення індентора в двох площинах, єдина площина переміщення індентора – горизонтальна, а зусилля, що фіксується, – тангенційне. Пристрій дозволяє знімати сканограму, яка описує процес опору руху індентора вздовж траси сканування, що коливається в режимі примусових коливань, характер яких визначається структурним станом та механічними властивостями матеріалу. Для кількісної оцінки структури покриття, яку характеризує сканограма, використані фрактальні уявлення [4]. Перспективність використання такого підходу полягає в можливості кількісної оцінки гетерогенності структури покриття через сукупність його механічних властивостей. Структура кожного досліджуваного матеріалу оцінюється визначенням значенням фрактальної розмірності D_s сукупності механічних властивостей покриттів в діапазоні від 2 до 3. Значення $D_s = 2$ характеризує "ідеальний, однофазний" матеріал без мікрodefektів, пор, включень. Зі зростанням величини D_s збільшується ступінь гетерогенності структури покриття. У таблиці наведені сканограми досліджуваних матеріалів та їх фрактальні розмірності D_s .

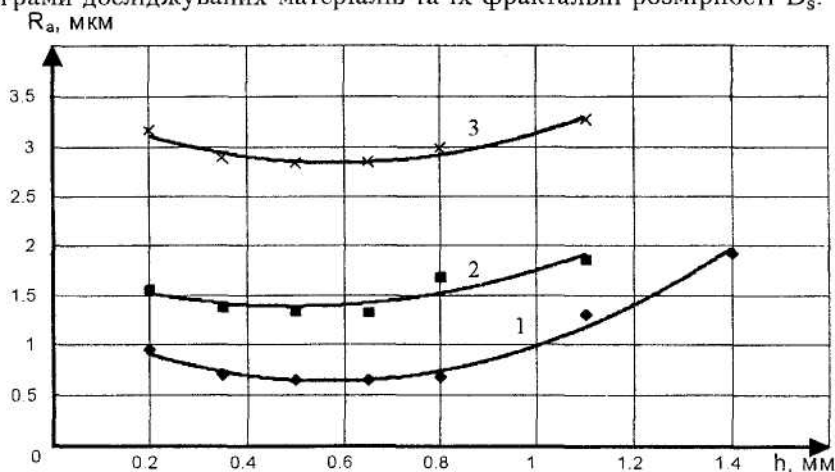


Рис. 2. Залежність шорсткості напиленої поверхні від глибини покриття: ($V = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,1$ мм; $t = 0,15$ мм): 1 – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$; 2 – електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$; 3 – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{79}Cr_{16}B_5$

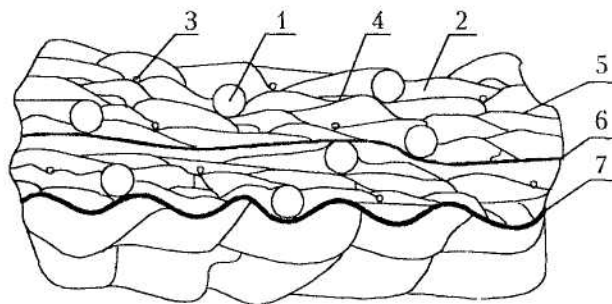


Рис. 3. Схема мікроструктури покриття з аморфно-кристалічною структурою: 1 – кристалічні сфероподібні частинки; 2 – дископодібні аморфні (аморфно-кристалічні) частинки; 3 – округлі частинки, сформовані від розбрикування дископодібних частинок; 4 – пори; 5 – межа між напиленими частинками в шарі покриття; 6 – межа між шарами покриття, напиленими за один прохід; 7 – межа між покриттям і основою

Для встановлення взаємозв'язку між величиною D_s матеріалу, яка характеризує його структуру, та параметрами шорсткості оброблюваної поверхні проводилось точіння зразка з газополуменевим покриттям товщиною 1,6 мм з порошку $Fe_{78}B_{10}Si_{12}$. В таблиці наведені типові сканограми і значення величин D_s , які характеризують шари покриття на рівні 0,6, 1, 1,4 мм від основи. На рис. 5 показана зміна висоти нерівностей в залежності від умов обробки для різної товщини даного покриття. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що зі зростанням значення D_s матеріалу покриття значно збільшується висота нерівностей та спостерігається зниження впливу режимів різання на шорсткість оброблюваної поверхні. Так, під час точіння поверхневого шару покриття з $D_s = 2,67$ практично непомітною є зміна величини подачі в шість разів та швидкості різання більш ніж в чотири рази. Обробка проводилась різцями ($\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$), які оснащені різальними пластинами ($r = 3,5$ мм) з полікристалічного надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору "киборит" [5]. Твердість досліджуваних покриттів складає 52 – 60 HRC, а інструмент, оснащений твердими сплавами, не дозволяє продуктивно та якісно оброблювати покриття твердістю більше 45 HRC [6, 7]. Експерименти проводились на токарних верстатах ФТ – 11 та 16Б05АФ1. Останній забезпечує безступінчасту зміну швидкості різання, що дозволяє проводити точіння з подачею 0,01мм/об та глибиною різання до 0,001 мм.



Рис. 4. Мікроструктура покриттів:

- a* – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{80}B_{20}$ ($\times 240$);
- b* – газополуменеве покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$ ($\times 480$);
- в* – електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($\times 400$)

На рис. 6 наведені залежності висоти мікровідхилень R_a від умов точіння для ряду покриттів. Під час визначення параметрів шорсткості великий вплив може здійснювати присутність пористості матеріалу, яка має різне значення за товщиною покриття. Проте, враховуючи, що пристрої типу "Talysurf" під час аналізу показників датчика проводять їх фільтрацію та не враховують значення ординат профілю, що не вписуються у загальну сукупність, отримані значення висотних параметрів шорсткості відповідають поверхні без пор.

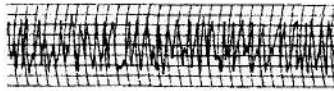


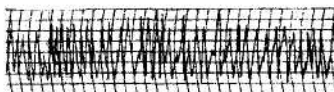
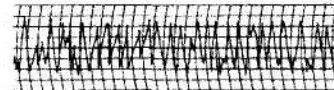


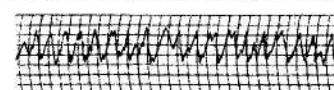
Варіювання режимами різання під час обробки газополуменевого покриття з порошку $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,76$) не призводить до суттєвої зміни висоти мікронерівностей та не дозволяє отримати точінням поверхні з низькою шорсткістю. Це пов'язано з особливостями структури такого покриття, для якого характерний низький ступінь деформації напилуваних частинок, наслідком чого є їхня недостатня міцність зчеплення між собою, висока пористість (рис. 4, *a*). Після травлення спостерігаються частинки з кристалічною структурою, які складають приблизно половину об'єму покриття. Як правило, ці частинки слабдеформовані і за структурою вони подібні до структури вихідного порошку. Під час точіння такого покриття утворюється елементна порошкоподібна стружка, що частково пов'язано з викришуванням та осипанням окремих частинок покриття.

При точінні газополуменевого покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ ($D_s = 2,31$) і з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,32$) (рис. 4, *б*), які характеризуються високою щільністю, шаровою структурою та незначною кількістю сферичних частинок, варіюванням умовами обробки можна суттєво наблизити мікрогеометрію поверхні до такої, яка вимагається умовами роботи. Зі зростанням подачі висота мікронерівностей покриття поступово зростає. Збільшення подачі призводить до зростання ролі допоміжної різальної кромки, що сприяє більшому витіканню

матеріалу в вершини нерівностей та їх деформуванню за рахунок зростання об'єму матеріалу, який підлягає дії пластичної деформації, в зоні стружкоутворення.

Таблиця 1

Фрактальні розмірності напилених покриттів

Тип покриття	Фрагмент сканограми	Фрактальна розмірність, D_s
газополуменеве покриття з порошку $Fe_{80}B_{20}$		2,76
електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$		2,57
газополуменеве покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$		2,32
газополуменеве покриття з порошку $Fe_{79}Cr_{16}B_5$		2,82
електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{79}Cr_{16}B_5$		2,68
газополуменеве покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ (відстань 0,6 мм від основи)		2,31
газополуменеве покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ (відстань 1,1 мм від основи)		2,58
газополуменеве покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$ (відстань 1,4 мм від основи)		2,67

Використання інструмента з великим радіусом при вершині призводить до незначного зростання величини R_a зі зростанням подачі. Залежність параметру шорсткості R_a від швидкості різання носить неоднозначний характер. У діапазоні швидкостей різання $v = 0,7 - 1$ м/с існує область з підвищеною шорсткістю поверхні. Стружка, яка утворюється при точінні, легко розділяється на елементи. Подальше збільшення швидкості різання викликає поступове зниження величини висотних параметрів шорсткості. Це обумовлено зменшенням об'єму пластичної деформації в зоні різання та зниженням коефіцієнта тертя між інструментом, стружкою та поверхнею деталі. Стружка, яка утворюється, із зростанням швидкості різання не розділяється на елементи, а подібна до зливної стружки при точінні сталей, що свідчить про те, що в процесі точіння відбувається зрізування шару покриття як відносно компактного матеріалу, а не окремих його елементів. Незначне збільшення висотних параметрів шорсткості поверхні при точінні з високими швидкостями різання пов'язане з інтенсифікацією фізико-хімічної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалу. В

цілому, незначний вплив швидкості різання визначається високою механічною твердістю та міцністю оброблюваних покриттів.

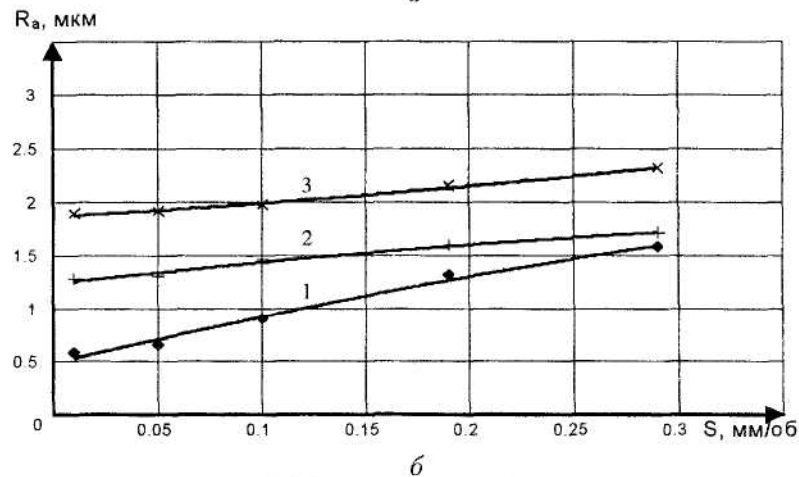
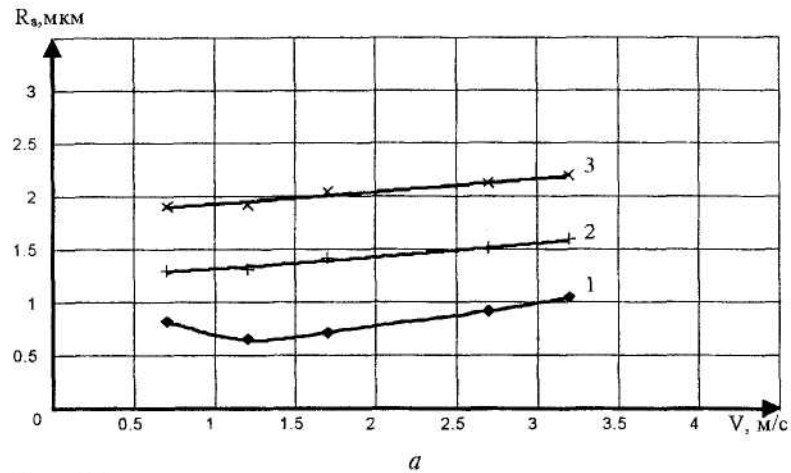


Рис. 5. Вплив швидкості різання (а) ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_z = 0,1$ мм) і подачі (б) ($V = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $h_z = 0,1$ мм) на шорсткість обробленої поверхні газополуменевого покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$: 1 – точіння на глибині 0,6 мм від основи; 2 – точіння на глибині 1,1 мм від основи; 3 – точіння на глибині 1,4 мм від основи

Цікаво оцінити вплив глибини різання на шорсткість поверхні, яка формується при точінні. Глибина різання залежить від оптимальної величини припуску, і при її призначенні в процесі точіння покриттів необхідно враховувати те, що вона пов'язана з необхідністю забезпечити експлуатаційні властивості оброблюваних деталей. За умови зменшення глибини різання, незважаючи на її малий вплив на процес пластичної деформації під час різання, при точінні досліджуваних напилених покриттів спостерігається зростання величини R_a (рис. 7). Це пов'язано з тим, що напилені покриття характеризуються шаровою структурою та сформовані з частинок порошку, хоча і сильно zdeформованих. Під час точіння з малими глибинами різання внаслідок недостатньо високої міцності зчеплення елементів покриття між собою створюються умови для їх виривання з матеріалу покриття, а сам процес точіння характеризується зростанням нестабільності.

Збільшення фаски зносу по задній поверхні різця h_z призводить до нерівномірного зростання величини R_a (рис. 7). Це пов'язано з тим, що на початкових стадіях зносу інструмента зростання сил на задній поверхні інструмента (сила P_y), яке призводить до виникнення вібрацій, компенсується збільшенням радіуса при вершині інструмента та виникненням вигладжуючого ефекту на задній поверхні (що не призводить до різкого збільшення шорсткості). За умов подальшого зростання величини h_z на задній поверхні різця утворюються зазубрини та змінюється форма і розташування різальної кромки, що сприяє збільшенню висоти нерівностей на оброблюваній поверхні.

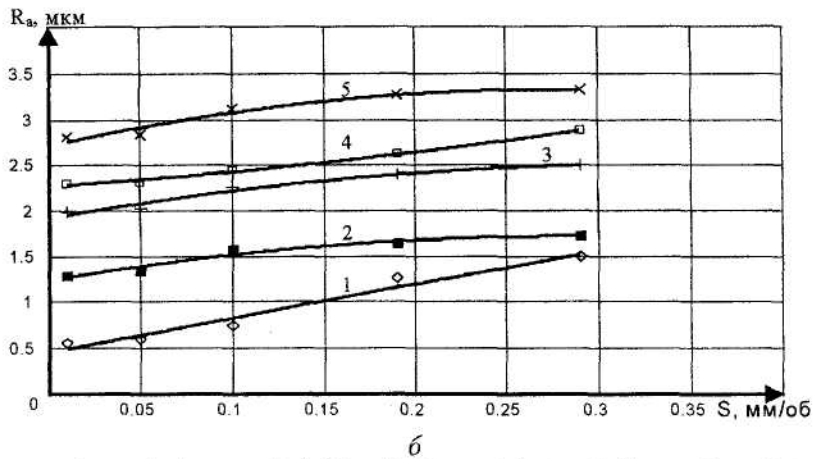
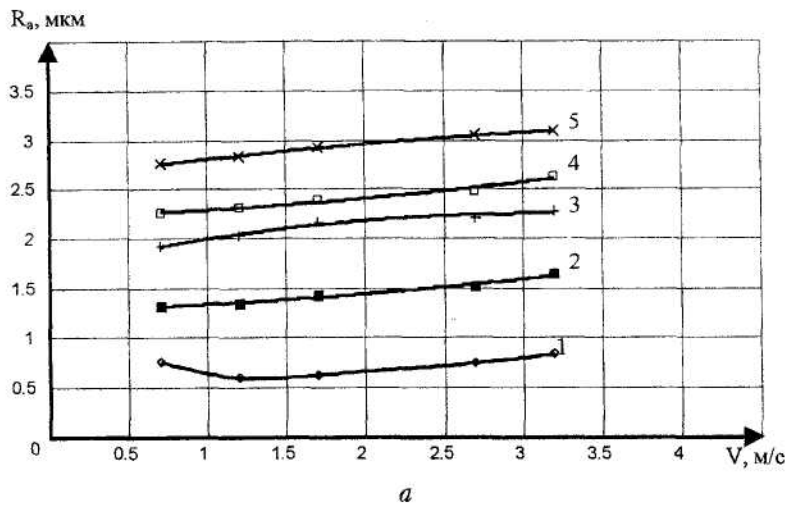


Рис. 6. Вплив швидкості різання (а) ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) та подачі (б) ($V = 1,2$ м/с; $t = 0,15$ мм; $h_3 = 0,1$ мм) на шорсткість напиленої поверхні:
 1 – газополуменеве покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$; 2 – електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$; 3 – електродугове покриття з порошкового дроту $Fe_{79}Cr_{16}B_5$; 4 – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{80}B_{20}$; 5 – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{79}Cr_{16}B_5$

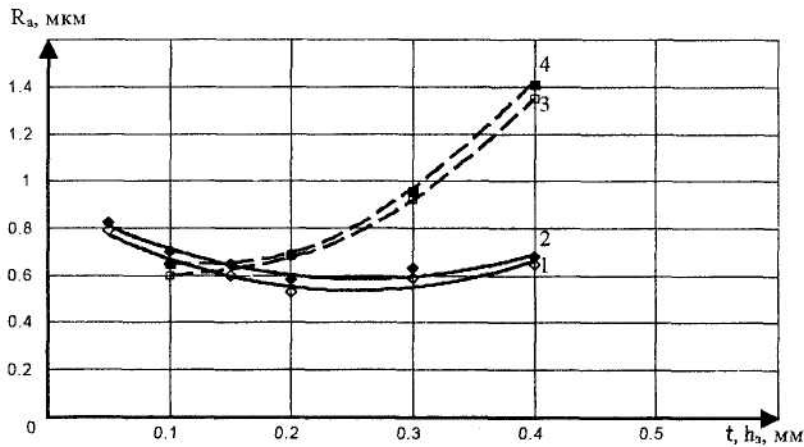


Рис. 7. Вплив глибини різання (—) ($V = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $h_3 = 0,1$ мм) і величини зносу по задній поверхні (---) ($V = 1,2$ м/с; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,15$ мм;) на шорсткість напиленої поверхні: 1, 3 – газополуменеве покриття з порошкового дроту $Fe_{80}B_{20}$; 2, 4 – газополуменеве покриття з порошку $Fe_{78}Si_{12}B_{10}$

Наведені результати досліджень свідчать про те, що неоднорідність структури матеріалу покриття здійснює основний вплив на шорсткість поверхні, яка формується при обробці. За величиною фрактальної розмірності D_s , сукупності механічних властивостей матеріалу можна прогнозувати значення висотних параметрів шорсткості поверхні покриття після обробки точінням.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ванштейн Б.К.* Дифракция рентгеновских лучей на цепочных молекулах. – М.: АН СССР. – 1963. – 372 с.
2. *Запорожец В.В.* Динамические характеристики прочности поверхностных слоев и их оценка // Трение и износ. – 1980. – Т. 1. – С. 602–609.
3. А. с. № 1714443 СССР. Прибор для склерометрических исследований / В.А. Ляшко, Ф.П. Смагленко, М.М. Потемкин и др. – 1992. – Бюл. № 7.
4. *Клименко С.А., Мельничук Ю.А.* Фрактальный подход к обработке резанием материалов и изделий // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин. – Киев: ИСМ НАНУ, 2001. – С. 22–32.
5. Сверхтвердый поликристаллический материал – киборит / Н.В. Новиков, А.А. Шульженко, С.А. Божко и др. // Инф. листок № 85–155. – Киев, 1985. – 3 с.
6. *Хасуи А., Моригаки О.* Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
7. Обработка твердосплавных покрытий. – М.: НИИТЭХИМ, 1983. – 48 с.

КЛИМЕНКО Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка різанням гетерогенних матеріалів;
- інструмент з полікристалічних надтвердих матеріалів;
- технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей деталей машин;
- механічна обробка покриттів.

МЕЛЬНИЧУК Юрій Олексійович – аспірант Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка різанням гетерогенних матеріалів;
- інструмент з полікристалічних надтвердих матеріалів;
- технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей деталей машин;
- механічна обробка покриттів.

Подано 26.07.2001