

14. Файнер Н.И., Косинова М.Л., Румянцев Ю.М. Тонкие пленки карбонитридов кремния и бора: синтез, исследование состава и структуры. – Рос. хим. журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2001. – № 3. – Т. XLV. – С. 101–108.
15. Lohse B.H., Salka A., Wexlerl D. Raman spectroscopy as a tool to study TiC formation during controlled ball milling // J. of Appl. Phys. – 2005. – V. 97. – P. 114912–7.
16. Dielectric properties of Ti₂AlC and Ti₂AlN MAX phases: The conductivity anisotropy / N. Haddad, E. Garcia-Caurel, L. Hultman et al. // J. of Appl. Phys. – 2008. – V. 104. – P. 023531–10.

Поступила 02.06.2014

УДК 621.623

Ю. Д. Філатов, В. І. Сідорко, доктори технічних наук; **В. Д. Курілович, А. Г. Ветров¹, М. А. Данильченко²; В. А. Ковальов²**, канд. техн. наук

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ДЕКОРАТИВНО-ХУДОЖНІХ ВИРОБІВ З ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ ІНСТРУМЕНТОМ З КАЛІБРОВАНОГО ЗА ДІАМЕТРОМ АЛМАЗНО-ПОЛІМЕРНОГО ВОЛОКНА

Описано вплив реологічних характеристик розплаву, технологічних параметрів витягування волокна та конструктивних параметрів філь'єри на діаметр алмазно-полімерного волокна. Встановлено, що діаметр волокна суттєво залежить від діаметра каналу філь'єри, рівня розплаву та швидкості витягування волокна. Показано, що при калібруванні волокна за діаметром необхідно враховувати розміри зерен абразивного порошку.

Ключові слова: алмазно-полімерне волокно, якість оброблення, природний камінь.

Вступ

Одним з визначальних чинників впливу на якість і продуктивність фінішного оброблення виробів з природного каменю є характеристика робочого шару інструменту. Марка, зернистість і концентрація алмазного порошку у зв'язці та фізико-механічні властивості останньої відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного зняття оброблюваного матеріалу та формуванні високоякісної поверхні виробу. Крім того, від зазначених характеристик залежить рівномірність розподілу алмазних або абразивних зерен у зв'язці та можливість утворення їх конгломератів. Для запобігання утворенню конгломератів зерен доцільно використовувати інструмент, робочий шар якого сформований з окремих волокон [1–3]. При витягуванні через філь'єру алмазно-полімерного волокна з розплаву шихти, до якої входять полімерний матеріал – поліетилентерефталат (ПЕТФ) та абразивний порошок, зерна розташовуються всередині волокна, не контактуючи між собою.

Аналіз виготовлення алмазно-полімерних волокон

У результаті аналізу витягування алмазно-полімерних волокон (АПВ) з розплаву через філь'єру встановлено закономірності впливу діаметра філь'єри, швидкості витягування, висоти рівня розплаву, його густини, в'язкості та поверхневого натягу на витрати розплаву і діаметр волокна [2].

Діаметр волокна, що витягується з розплаву, визначаємо формулою [2]

$$d_f = \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{\rho g}{2\eta V_0} \left(\frac{H_u}{H} + \frac{6\sigma d_0 \cos \vartheta}{\rho g d^3} \right)}, \quad (1)$$

де d_0 , H – відповідно діаметр і довжина каналу філь’єри; ρ – густина розплаву; g – прискорення вільного падіння; η – коефіцієнт в’язкості; V_0 – швидкість витягування; H_u – висота рівня розплаву; σ – коефіцієнт поверхневого натягу; ϑ – кут змочування поверхні філь’єри розплавом; d – діаметр філь’єри.

Згідно з формулою (1) можна розрахувати діаметр алмазно-полімерного волокна за реологічними характеристиками розплаву (коефіцієнтом поверхневого натягу, динамічною в’язкістю, густиною та кутом змочування), технологічними параметрами процесу витягування волокна (швидкістю витягування та висотою рівня розплаву в ємкості екструзивного пристрою) та конструктивними параметрами філь’єри (діаметром і довжиною каналу, діаметром філь’єри).

Залежності діаметра волокна від коефіцієнта динамічної в’язкості за різних рівнів розплаву (1 – $H_u = 0,01$ м; 2 – $H_u = 0,03$ м; 3 – $H_u = 0,07$ м), які показують, що при зменшенні в’язкості розплаву (з підвищенням температури нагрівання ємкості екструзивного пристрою) діаметр волокна значно збільшується, показано на рис. 1.

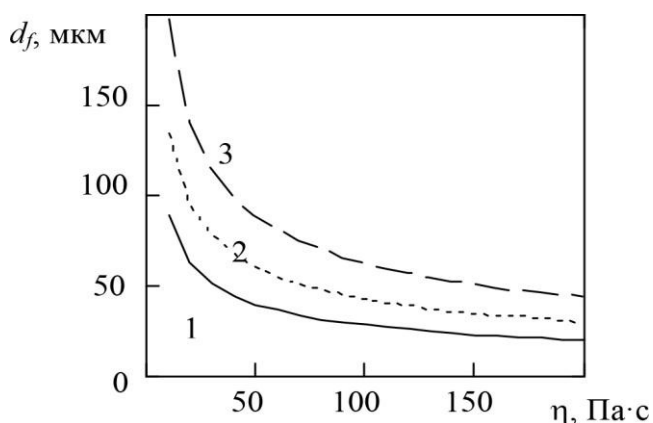


Рис. 1. Залежності діаметра волокна від коефіцієнта в’язкості за різних рівнів розплаву: 1 – $H_u = 0,01$ м; 2 – $H_u = 0,03$ м; 3 – $H_u = 0,07$ м

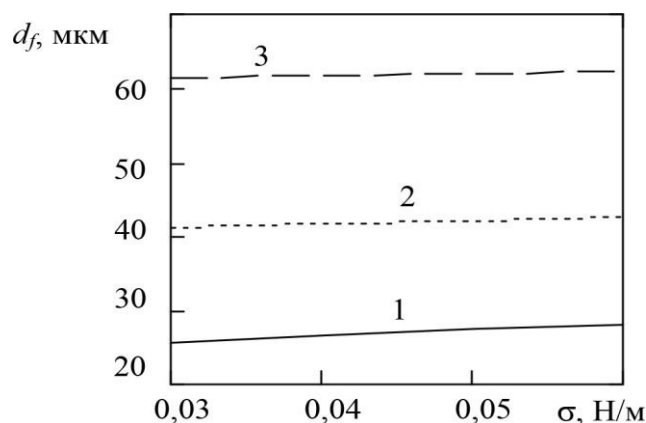


Рис. 2. Залежності діаметра волокна від коефіцієнта поверхневого натягу за різних рівнів розплаву: 1 – $H_u = 0,01$ м; 2 – $H_u = 0,03$ м; 3 – $H_u = 0,07$ м

За результатами аналізу залежностей діаметра волокна від коефіцієнта поверхневого натягу (рис. 2) та густини розплаву (рис. 3) доходимо висновку, що при їх збільшенні діаметр алмазно-полімерного волокна, що витягується з розплаву, незалежно від висоти рівня розплаву в ємкості екструзивного пристрою (1 – $H_u = 0,01$ м; 2 – $H_u = 0,03$ м; 3 – $H_u = 0,07$ м) дещо збільшується. Так, у разі зміни коефіцієнта поверхневого натягу розплаву в межах 0,03–0,06 Па·с та густини розплаву в межах 1,35–1,40 г/см³ діаметр волокна не змінюється.

З наведених даних випливає, що змінювати температуру нагрівання ємкості екструзивного пристрою, а отже реологічні характеристики розплаву при витягуванні алмазно-полімерного волокна недоцільно, оскільки прогнозувати його діаметр неможливо.

Із формули (1) також випливає, що діаметр волокна при витягуванні з розплаву значно залежить від діаметра каналу філь’єри (рис. 4), рівня розплаву в екструзивному пристрої (рис. 5) та швидкості витягування волокна (рис. 6).

Залежності діаметра волокна від діаметра каналу філь’єри (див. рис. 4) при швидкості витягування волокна $V_0 = 0,3$ м/с у різні моменти часу (1 – $t = 0$; 2 – $t = 2$ с; 3 – $t = 5$ с) свідчать, що при використанні філь’єр більшого діаметра каналу діаметр АПВ збільшується за квадратичним законом $\sim d_0^2$.

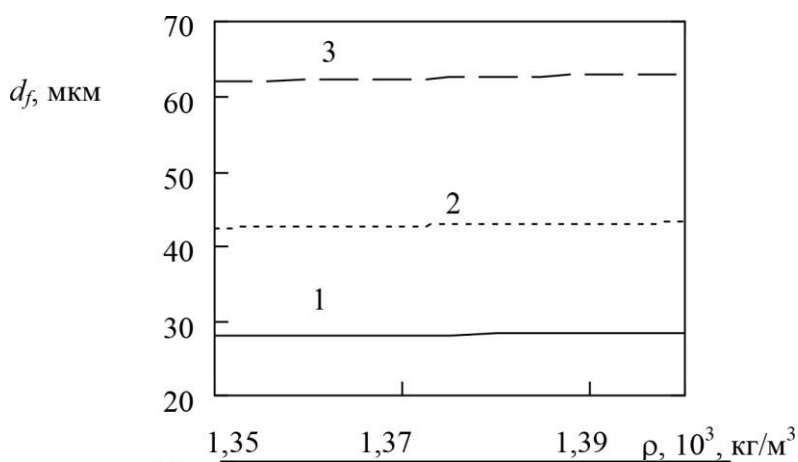


Рис. 3. Залежності діаметра волокна від густини розплаву за різних рівнів розплаву:
1 – $H_u = 0,01$ м; 2 – $H_u = 0,03$ м;
3 – $H_u = 0,07$ м

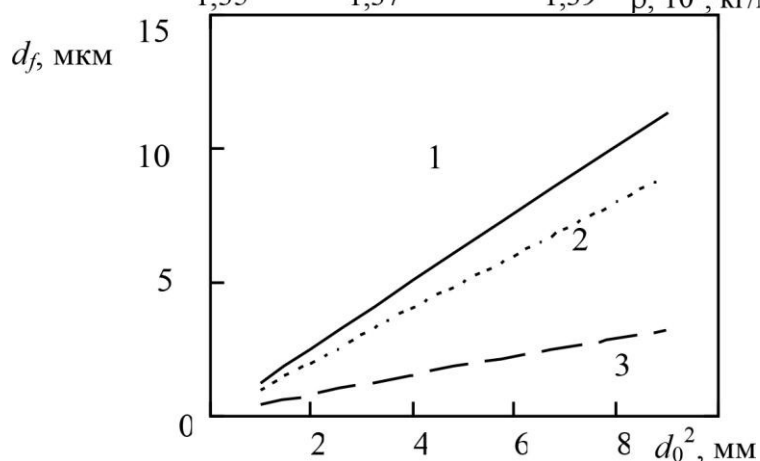


Рис. 4. Залежності діаметра волокна від діаметра каналу філь'єри: 1 – $t = 0$; 2 – $t = 2$ с;
3 – $t = 5$ с

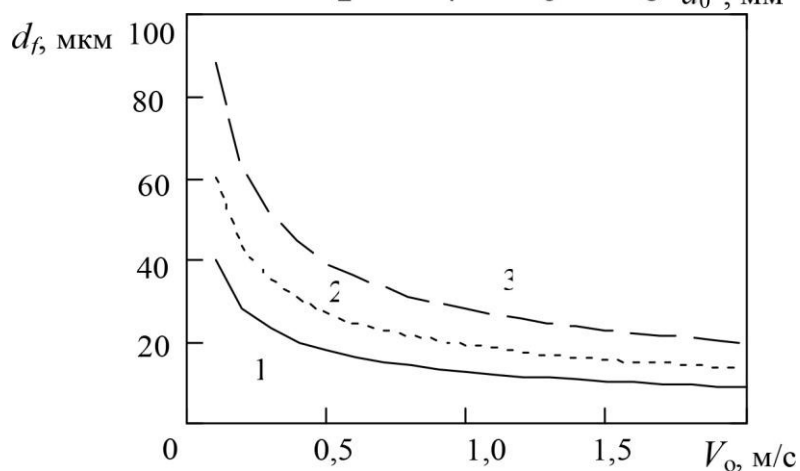


Рис. 5. Залежності діаметра волокна від рівня розплаву в екструзивному пристрої:
1 – $V_0 = 0,1$ м/с; 2 – $V_0 = 0,3$ м/с;
3 – $V_0 = 1,0$ м/с

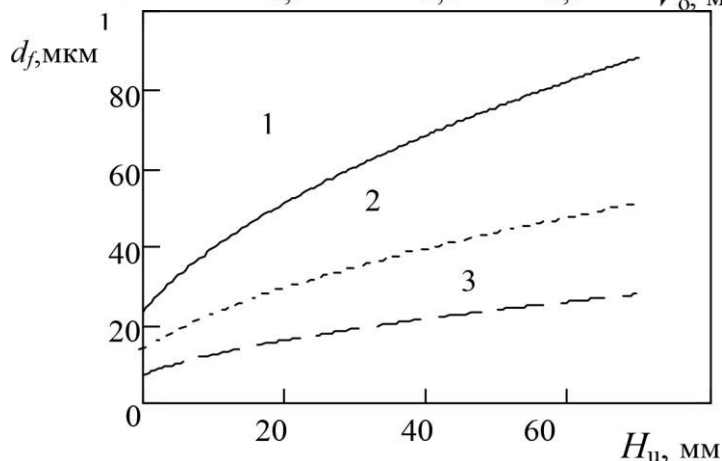


Рис. 6. Залежності діаметра волокна від швидкості витягування: 1 – $H_u = 0,01$ м;
2 – $H_u = 0,03$ м; 3 – $H_u = 0,07$ м

Проаналізувавши вплив рівня розплаву на діаметр волокна, доходимо висновку, що при витягуванні волокна з розплаву діаметр волокна постійно зменшується (див. рис. 5). Це

означає, що для отримання каліброваного за діаметром волокна необхідно постійно підтримувати сталий рівень розплаву в екструзивному пристрої. Зазвичай, при виробництві всіх видів волокна виконують підшихтовування, тобто в міру зниження рівня розплаву в ємкість екструзивного пристрою постійно додають шихту. Це неприпустимо щодо економічної доцільності, коли йдеться про шихту з алмазними порошками.

Як впливає з аналізу впливу швидкості витягування алмазно-полімерного волокна з розплаву (див. рис. 6), у разі підвищення швидкості витягування волокна зменшується його діаметр. Оскільки волокно, що витягується з розплаву, зазвичай намотується на бобіну, її реальний діаметр збільшується внаслідок збільшення шарів намотаного волокна. Це призводить до того, що при сталій кутовій частоті обертання бобіни лінійна швидкість витягування волокна збільшується. Для досягнення постійного діаметра волокна за умови сталості рівня розплаву (див. рис. 6) та забезпечення сталості швидкості витягування необхідно в міру намотування волокна на бобину знижувати частоту її обертання.

Калібрування алмазно-полімерного волокна за діаметром

Швидкість витягування волокна з розплаву при намотуванні змінюється, оскільки реальний радіус бобіни збільшується (рис. 7). В процесі витягування з розплаву сформоване волокно намотується на бобіну радіуса R_0 , що обертається з кутовою швидкістю Ω_t , пропорційно якій змінюється лінійна швидкість витягування $V_0 = \Omega_t R_0$. Намотування волокна на бобіну відбувається так: за час одного обертання бобіни $t_1 = \frac{1}{n} = \frac{2\pi}{\Omega_t}$ (n – частота

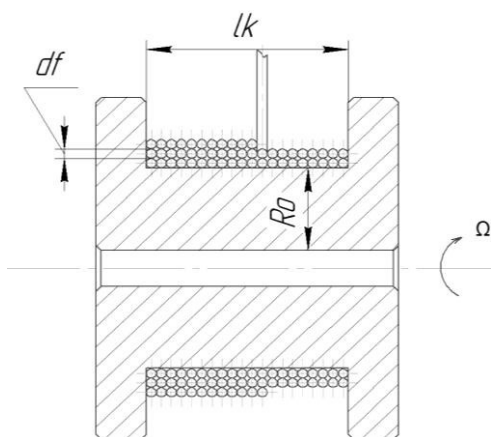


Рис. 7. Схема намотування полімерного волокна на бобіну

обертання бобіни, об./хв) намотується один виток волокна; витки за час $t_2 = t_1 \frac{l_k}{d_f}$ (де l_k – довжина

бобіни) заповнюють шар волокна, на який у подальшому намотуватиметься наступний шар, тобто радіус бобіни збільшується на d_f . За час t приріст радіуса бобіни δR можна визначити за формулою

$$\delta R = d_f \frac{t}{t_2} = \frac{(d_f)^2 \Omega_t t}{2\pi l_k}. \quad (2)$$

З урахуванням формули (2) можна визначити залежність швидкості витягування волокна від часу з урахуванням приросту радіусу бобіни:

$$V_0 = \Omega_t (R_0 + \delta R) = \Omega_t \left(R_0 + \frac{(d_f)^2 \Omega_t t}{2\pi l_k} \right). \quad (3)$$

Підставляючи значення швидкості витягування волокна в (1), отримуємо трансцендентне рівняння для визначення діаметра волокна

$$d_f = \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{\rho g}{2\eta \Omega_t \left(R_0 + \frac{(d_f)^2 \Omega_t t}{2\pi l_k} \right)} \left(\frac{(H_{u0} - k_u t)}{H} + \frac{6\sigma d_0 \cos \vartheta}{\rho g d^3} \right)}, \quad (4)$$

де $k_u = 1,37 \cdot 10^{-6}$ м/с – коефіцієнт, що характеризує швидкість зниження рівня розплаву; $H_{u0} = 70$ мм – початковий рівень розплаву.

Для розв'язування рівняння (4) вводимо допоміжні безрозмірні функції: $D = \frac{2d_f}{d_0}$ –

пряма 1,
$$\Phi(t, \Omega_t) = \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{\rho g}{2\eta\Omega_t \left(R_0 + \frac{(d_f)^2 \Omega_t t}{2\pi l_k} \right)} \left(\frac{H_u(t)}{H} + \frac{6\sigma d_0 \cos\vartheta}{\rho g d^3} \right)}$$
 – криві 2 (для різних

значень часу), графіки яких показано на рис. 8.

За наближеними методами обчислення програми Mathcad розв'язали систему рівнянь $\begin{cases} D = \Phi(t, \Omega_t), \\ d_f = const, \end{cases}$ у результаті отримали значення кутової швидкості обертання бобіни Ω_t

залежно від часу (рис. 9), за яких забезпечується постійний діаметр волокна. Отриману залежність можна апроксимувати прямою $\omega_t = \omega_0 + k t$ (де $\omega_0 = 11,1 \text{ c}^{-1}$; $k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-2}$; рис. 9).

Зниження кутової швидкості обертання бобіни від часу відповідно до розрахованих залежностей (рис. 9) забезпечує сталість діаметра АПВ за рахунок компенсації негативного впливу одночасної зміни рівня розплаву (для процесу без підшихтовування) та радіуса бобіни.

Традиційно витягування волокон характеризується тим, що для стабілізації лінійної густини волокна (1 текс = г/км), за якою оцінюють його середній діаметр при постійному підшихтовуванні та зменшенні частоти обертання бобіни намотуючого пристрою для компенсації впливу приросту її реального радіуса. Так, для витягування АПВ за умови підшихтовування слід було б знижувати кутову швидкість обертання бобіни вдвічі повільніше, ніж для розробленого процесу (рис. 9): від $11,1 \text{ c}^{-1}$ (у початковий момент) до $7,5 \text{ c}^{-1}$ (за 11 год).

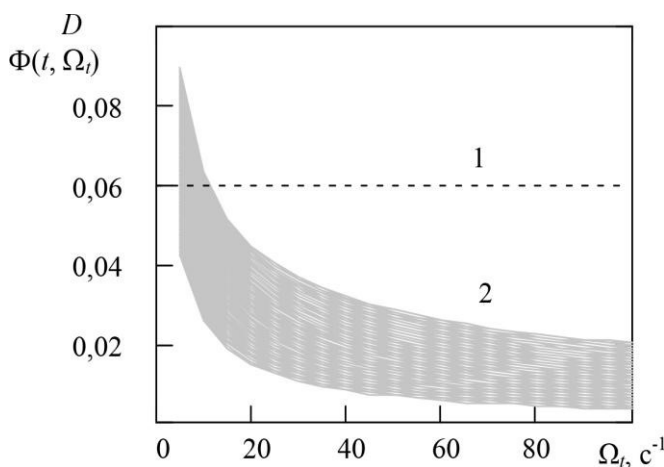


Рис. 8. Графіки функцій D і $\Phi(t, \Omega_t)$

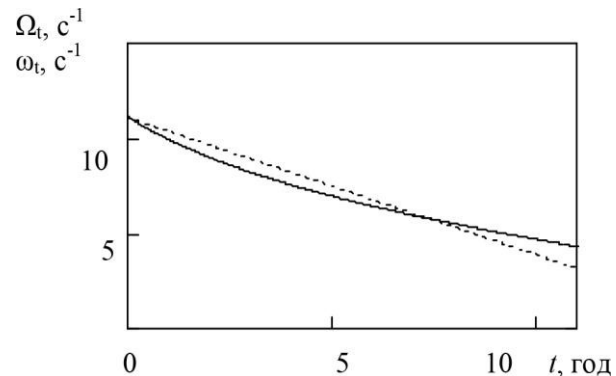


Рис. 9. Залежності кутової швидкості обертання бобіни від часу витягування АПВ

Для виготовлення алмазно-полімерного волокна розробили та виготовили спеціальну установку, до якої входять нагрівач, намотуючий пристрій з можливістю регулювання частоти обертання бобіни в діапазоні 10–110 об./хв, екструзивний пристрій зі змінними філь'ерами. Алмазно-полімерну шихту готували в окремій ємкості при розплавленні певної кількості ПЕТФ за температури 285–310 °С, додавання такої кількості алмазного порошку, що забезпечить необхідну концентрацію алмаза в інструменті, а також за ретельного перемішування суміші. До ємкості екструзивного пристрою, вставленої в нагрівач, заливали шихту і нагрівали її до температури 310°С. Волокно, що витягувалось з розплаву алмазовмісної шихти, намотували на бобіну намотуючого пристрою.

Розплав шихти мав такі параметри: густину $1,37 \text{ г/см}^3$; коефіцієнт в'язкості $\eta = 100 \text{ Па}\cdot\text{с}$; коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma = 0,06 \text{ Н/м}$, кут змочування розплавом філь'ери $\vartheta = 12^\circ$.

Витягування АПВ здійснювали через філь'єру діаметром 2 мм та діаметром каналу 1,5 мм, довжиною 6,5 мм, при висоті рівня розплаву 70 мм та частоті обертання бобіни 106 об./хв.

Для виготовлення каліброваного алмазно-полімерного волокна необхідно враховувати розміри верхньої та нижньої меж основної фракції зерен абразивного порошку щодо діаметра волокна. Для того щоб зерна абразивного порошку у волокні розташовувались по одному в кожному його поперечному перерізі, необхідно щоб виконувалась умова [4] $d_{\max} < d_f < 2d_{\min}$ (де d_{\max} , d_{\min} – верхня та нижня межа основної фракції зерен абразивного порошку відповідно). Для запобігання утворенню конгломератів зерен абразиву необхідно враховувати зерновий склад використовуваних абразивних порошоків (наявність дрібних зерен у комплексній фракції порівняно з основною) за умови $d_3 > 0,75 d_f$ (d_3 – розмір зерна основної фракції).

Висновки

Запропоновано метод калібрування алмазно-полімерного волокна за діаметром та забезпечення його постійного значення ($d_f = \text{const}$) протягом усього часу витягування, який полягає в тому, що при виробництві волокна на розробленій установці частоту обертання бобіни слід зменшувати згідно з лінійною залежністю $n(t) = n_0 - k_0 t$ ($n_0 = 100$ об./хв; $k_0 = 0,1$ хв⁻¹). Показано, що для калібрування алмазного та абразивного полімерного волокна за діаметром при витягуванні волокна доцільно змінювати частоту обертання бобіни дискретно, періодично зменшуючи її приблизно на 9–10 об./хв через кожні 1,5 год.

Описано влияние реологических характеристик расплава, технологических параметров вытягивания волокна и конструктивных параметров фильеры на диаметр алмазно-полимерного волокна. Установлено, что диаметр волокна существенно зависит от диаметра канала фильеры, уровня расплава и скорости вытягивания волокна. Показано, что при калибровке волокна по диаметру необходимо учитывать размеры зерен абразивного порошка.

Ключевые слова: алмазно-полимерное волокно, качество обработки, природный камень.

Describes the effect of the melt rheology, technological fiber drawing process parameters and design parameters on the die diameter diamond-polymer fibers. Found that the diameter of the fiber depends significantly on the channel diameter of the die, the melt level and speed fiber drawing. It is shown that the fiber diameter calibration must consider the size of the abrasive grain powder.

Key words: diamond-polymer fiber, processing quality, natural stone.

Література

1. Курілович В.Д., Ковальов С.В., Філатов Ю.Д. Підвищення ефективності фактурної алмазно-абразивної обробки природного каменю // Вестн. Нац. техн. ун-та України «Киевский политехнический институт»: Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ», 2012. – Вып. 64. – С. 106–112.
2. Курілович В.Д., Філатов Ю.Д., Ковальов В.А. Підвищення ефективності фінішної обробки виробів з природного каменю інструментом із алмазно-полімерного волокна // Сверхтвердые матер. – 2014. – № 1. – С. 49–58.
3. Філатов Ю.Д., Курілович В.Д. Виготовлення алмазно-полієфірного волокна для фінішної обробки природного каменю // Матер. 11-го Междунар. научн.-техн. семинара «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте», 21–25 февр. 2011 г., г. Свалява. – К.: АТМ України, 2011. – С. 305–307.
4. Пат. на корисну мод. № 38450 Україна, МПК (2006) B24D 17/00. Абразивне волокно / Ю.Д. Філатов, В.Д. Курілович, В.І. Сідорко, С.В. Ковальов, В.Г. Крамар – Опубл. 12.01.2009; Бюл. № 1.

Надійшла 26.05.14