

УДК 621.923

**Ю.Д. ФИЛАТОВ, В.А. КОВАЛЕВ, О.Я. ЮРЧИШИН****ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ**

Метою роботи є дослідження впливу кінематичних параметрів налагодження верстату на точність формоутворення плоских поверхонь деталей електронної техніки та оптичних систем з кристалічного кварцу при поліруванні, а також визначення їх найбільш доцільних значень, за яких досягається необхідна точність геометричної форми полірованих поверхонь. В результаті дослідження вивчено закон омірності утворення форми оброблюваної плоскої поверхні прецизійної оптичної деталі в процесі полірування. На основі узагальненої фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу, а також методу усереднення відносної швидкості переміщення інструмента і деталі отримані залежності зміни оброблюваного матеріалу, що характеризують еволюцію форми полірованої поверхні та величину відхилення від площинності. Визначено найбільш доцільні значення кінематичних параметрів, за яких підвищується точність формоутворення.

**Ключові слова:** полірування, точність форми, відхилення від площинності.

Целью работы является исследование влияния кинематических параметров настройки станка на точность формообразования плоских поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из кристаллического кварца при полировании, а также определение их наиболее рациональных значений, при которых достигается требуемая точность геометрической формы полированных поверхностей. В результате исследования изучены закономерности формообразования обрабатываемой плоской поверхности прецизионной оптической детали в процессе полирования. На основе обобщенной физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама, а также метода усреднения относительной скорости перемещения инструмента и детали изучены зависимости съема обрабатываемого материала, характеризующие эволюцию формы полированной поверхности и величину отклонения от плоскостности. Определены наиболее целесообразные значения кинематических параметров, при которых повышается точность формообразования.

**Ключевые слова:** полирование, точность формы, отклонение от плоскостности.

The aim is to investigate the influence of kinematic machine settings on the accuracy of formation forms a flat surfaces of parts of electronic devices and optical systems of crystalline silica during polishing, as well as the determination of their most rational values for which the required accuracy is achieved by the geometrical shape of the polished surfaces. The studies examined laws of formation forms a flat surface machined of precision optical parts in the process of polishing. On the basis of the generalized physical-statistical model of the formation and removal of particles slime, and the method of averaging the relative speed of movement of the tool and workpiece are obtained depending removal of the processed material, characterizing the evolution of the shape of the polished surface and the deviation from flatness. Determined the most appropriate values of kinematic parameters for which improves the accuracy of formation.

**Keywords:** polished, form accuracy, flatness.

**Постановка проблеми.** Высокая точность формообразования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем при полировании может быть достигнута за счет использования оптимальных кинематических и режимных параметров процесса обработки, выбора наиболее рациональной конструкции и характеристики полировальника. Моделирование процесса образования формы оптических поверхностей и применение экспериментально-теоретических методов определения показателей съема обрабатываемого материала по круговым зонам обрабатываемой поверхности и отклонения ее формы от требуемой, основаны на обобщенной физико-статистической модели образования частиц шлама и их удаления с обрабатываемой поверхности [1–4]. Формообразование поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из оптического стекла, керамики, оптических (кварц [5], сапфир [6]) и полупроводниковых (карбид кремния [7–8], нитрид галлия [9]) кристаллов осуществляется при полировании по традиционной технологии.

**Целью** исследования является изучение влияния кинематических параметров настройки станка на точность формообразования плоских поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из кристаллического кварца при полировании, а также определение их наиболее рациональных значений, при которых достигается требуемая точность геометрической формы полированных поверхностей.

Детали из кварца диаметром 60 мм полировали на шлифовально-полировальном устройстве, оснащенной системой мониторинга качества полированной поверхности, по традиционной технологии (метод жестких осей) при помощи полировального инструмента диаметром 60 мм, рабочий слой которого выполнен из 15 элементов «Аквапол» диаметром 10 мм, при следующих режимах: частота вращения детали – 800 об/мин, усилие прижима инструмента к детали – 10 Н, время цикла полирования 5–6 мин. При принудительном вращении детали (нижнее звено) инструмент (верхнее звено) вращается в том же направлении за счет сил трения между их притирающимися поверхностями, угловые скорости их вращения  $\omega_1 = 83,8 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_2 = 78,5 \text{ с}^{-1}$ , их возвратно-поступательное перемещение отсутствует (длина штриха  $L = 0$ , несимметрия штриха  $e_0 \in [2,5 \text{ мм}; 15 \text{ мм}]$ ). При полировании плоских поверхностей деталей из кварца использовался также нетрадиционный метод обработки, при котором для осуществления взаимного перемещения инструмента и детали используется не устройство станка, а эксцентричное вращение нижнего звена, за счет которого происходит изменение расстояния между их центрами.

При полировании плоских деталей из кварца по традиционной технологии (схема а, [1]) модуль вектора скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по рабочей поверхности инструмента выражается формулой

$$V_1(\rho, r, e_0) = [(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 r^2 - \omega_1 \rho^2) + \omega_1 \omega_2 e_0^2]^{1/2} \text{ (где } r -$$

© Ю.Д. Филатов, В.А. Ковалев, О.Я. Юрчишин, 2016

радиус круговых зон инструмента), а ее усредненная по  $r \in [e_0 - \rho, e_0 + \rho]$  величина в зависимости от радиуса  $\rho$  круговых зон определяется по формуле

$$u_1(\rho) = \frac{1}{2\rho} \int_{e_0-\rho}^{e_0+\rho} V_1(\rho, r, e_0) dr. \quad (1)$$

При полировании плоских поверхностей деталей из кварца при эксцентричном вращении нижнего звена (схема б, [1]) обеспечивается периодическое изменение расстояния между центрами инструмента и детали. В отличие от классического процесса формообразования радиус дуги, по которой движется центр верхнего звена по поверхности нижнего определяется эксцентриситетом  $e_1$  (расстоянием между осью вращения и геометрическим центром поверхности детали) и расстоянием  $e_2$  между осями вращения детали и инструмента. Возвратно-поступательное перемещение детали относительно поверхности инструмента характеризуется параметрами  $e_1 \in [1 \text{ мм}; 10 \text{ мм}]$  и  $e_2 \in [1 \text{ мм}; 3 \text{ мм}]$ . Модуль вектора скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности кварцевой детали по поверхности рабочего слоя инструмента выражается в соответствии с формулой

$V_2(\rho, r, e_1, e_2, \varphi) = [(\omega_2 - \omega_1)[\omega_2 r^2 - \omega_1(\rho^2 + e_1^2 + 2\rho e_1 \cos \varphi) + \omega_1 \omega_2 e_2^2]^{1/2}$ , а усредненная по  $r \in [e_2 - e_1, e_2 + e_1]$  и  $\varphi \in [0, \pi]$  относительная скорость перемещения в зависимости от радиуса  $\rho$  круговых зон определяется по формуле

$$u_2(\rho) = \frac{1}{2\pi e_1} \int_0^\pi d\varphi \int_{e_2-e_1}^{e_2+e_1} V_2(\rho, r, e_1, e_2, \varphi) dr. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены зависимости скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности детали из кварца по поверхности инструмента от радиуса круговых зон при полировании по традиционной технологии (а) и при эксцентричном вращении детали (б). При увеличении кинематических параметров  $e_0$ ,  $e_1$  и  $e_2$  величина относительной скорости для схем а и б увеличивается. При предельном переходе от схемы б к схеме а ( $e_1 \rightarrow 0$ ,  $e_2 \rightarrow e_0$ ) величина модуля скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности детали по поверхности инструмента для каждого радиуса круговых зон удовлетворяет условию:  $u_2(\rho) \rightarrow u_1(\rho)$ . Действительно, рассчитанные по формулам (1) и (2) значения скоростей в

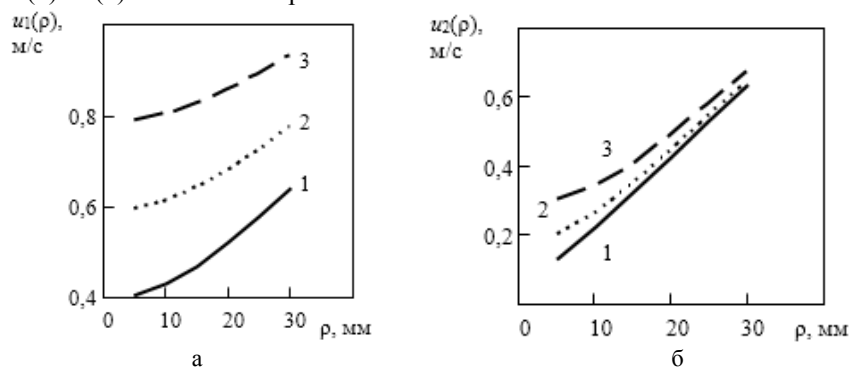


Рис. 1 – Зависимость скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по поверхности инструмента от радиуса круговых зон: а –  $e_0=2,5$  мм (1); 7,5 мм (2); 10 мм (3); б –  $e_1=1$  мм,  $e_2=1$  мм (1);  $e_1=2$  мм (2);  $e_1=10$  мм,  $e_2=3$  мм (3).

центральной зоне детали ( $\rho \rightarrow 0$ ), например при  $e_1=0$ ,  $e_2=e_0=7,5$  мм, практически совпадают  $u_2(0)=u_1(0)=0,59$  м/с.

Зависимости расчетных значений интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон детали, характерные для схем а и б, при различных параметрах настройки  $e_0$ ,  $e_1$ ,  $e_2$  приведены на рис. 2. При переходе от схемы а к схеме б ( $e_1 \rightarrow 0$ ,  $e_2 \rightarrow e_0=7,5$  мм), расчетные значения интенсивности съема обрабатываемого материала в средней зоне обрабатываемой поверхности ( $\rho=20$  мм) составляют  $Q_1=1,45 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_2=1,57 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с соответственно и незначительно отличаются от экспериментально измеренных величин:  $(1,4 \pm 0,2)$  мг и  $(1,5 \pm 0,2)$  мг за время полирования 6 мин (отклонение 15%).

Монотонно возрастающие зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон детали (рис. 2) свидетельствуют о том, что форма обработанной поверхности детали – выпуклая («бугор»), а отклонение от плоскостности определяется величиной  $\delta_t = \frac{Q(D_1/2) - Q(0)}{S} t$  ( $S$  – площадь обрабатываемой поверхности,  $t$  – время полирования). Эволюция формы обработанной поверхности детали характеризуется скоростью увеличения отклонения от плоскостности во время полирования  $\delta = \delta_t/t$ .

При полировании деталей из кварца по традиционной технологии (схема а) скорость изменения неплоскостности зависит от несимметрии штриха  $e_0$  (рис. 3) и изменяется в пределах от 0,05 до 0,15 мкм/мин. За время полирования  $t=6$  мин при среднем значении  $e_0=7,5$  мм неплоскостности обработанной поверхности детали достигает величины 0,40 мкм.

При полировании деталей по схеме б скорость изменения неплоскостности обработанной поверхности зависит от кинематических параметров  $e_1$  и  $e_2$ .

При увеличении параметра  $e_1$  неплоскостность детали незначительно возрастает (рис. 4) при всех значениях  $e_2$  и изменяется в пределах от 0,054 мкм/мин (при  $e_2=1$  мм) до 0,059 мкм/мин (при  $e_2=3$  мм).

При увеличении параметра  $e_2$  скорость изменения неплоскостности обрабатываемой поверхности очень незначительно возрастает (рис. 5) при всех значениях  $e_1$  и изменяется в пределах от 0,054 мкм/мин (при  $e_1=1$  мм) до 0,059 мкм/мин (при  $e_1=10$  мм).

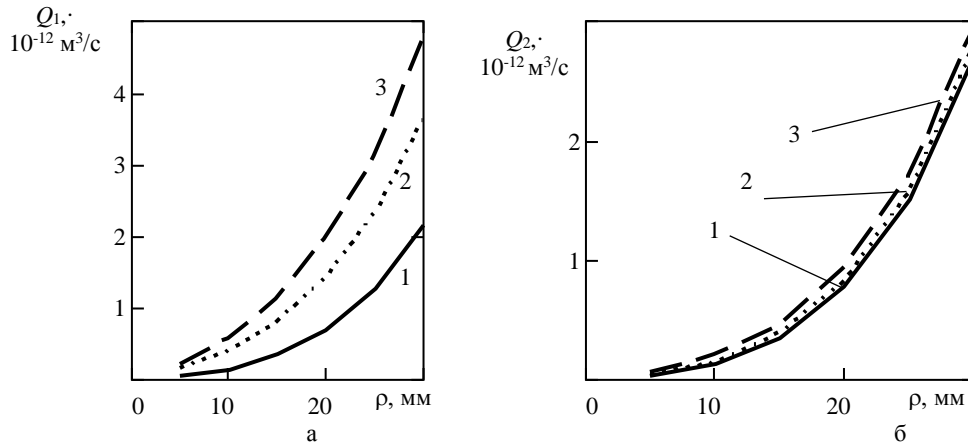


Рис. 2 – Зависимость интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности: а –  $e_0 = 2,5$  мм (1); 7,5 мм (2); 10 мм (3); б –  $e_1 = 1$  мм,  $e_2 = 1$  мм (1);  $e_1 = 5$  мм,  $e_2 = 2$  мм (2);  $e_1 = 10$  мм,  $e_2 = 3$  мм (3)

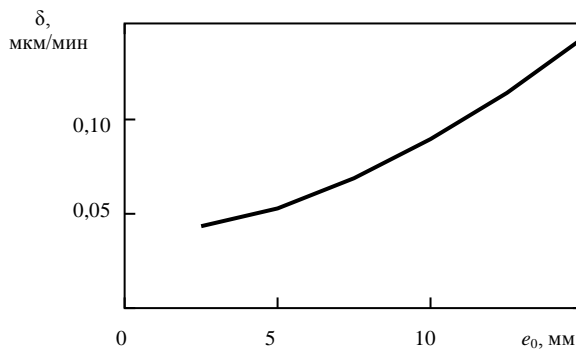


Рис. 3 – Зависимость скорости изменения неплоскостности обработанной поверхности от несимметрии штриха  $e_0$

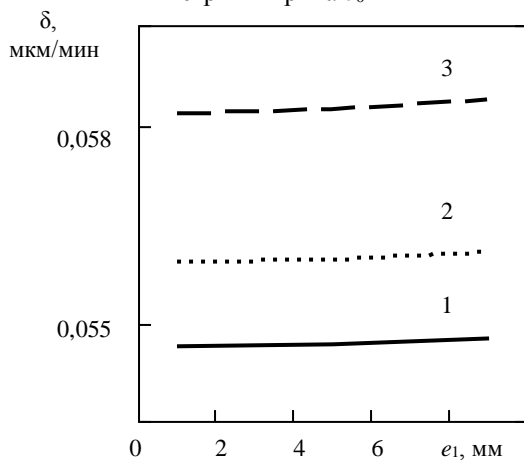


Рис. 4 – Зависимость скорости изменения неплоскостности обработанной поверхности от эксцентриситета  $e_1$ : 1 –  $e_2 = 1$  мм, 2 –  $e_2 = 2$  мм, 3 –  $e_2 = 3$  мм

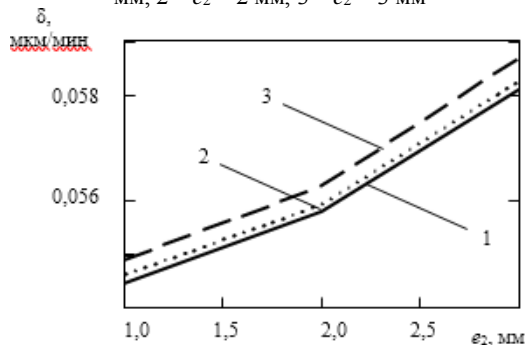


Рис. 5 – Зависимость скорости изменения неплоскостности обработанной поверхности от параметра  $e_2$ : 1 –  $e_1 = 1$  мм, 2 –  $e_1 = 5$  мм, 3 –  $e_1 = 10$  мм

За время полирования 6 мин при средних значениях кинематических параметров  $e_1 = 5,0$  мм и  $e_2 = 2,0$  мм неплоскостность обработанной поверхности детали достигает величины 0,34 мкм.

Сравнительный анализ процесса формообразования плоских поверхностей при полировании указанных деталей в описанных выше условиях показал, что точность формы обработанных поверхностей, достигаемая при использовании схем а и б, практически одинакова и оценивается величиной неплоскостности 0,3–0,4 мкм. Это позволяет обрабатывать оптические детали высокой и средней точности с плоскостностью поверхности  $N = 2$  интерференционных кольца (приблизительно 0,5 мкм). Это позволяет обрабатывать оптические детали высокой и средней точности с плоскостностью поверхности  $N = 2$  интерференционных кольца (приблизительно 0,5 мкм). Следует отметить, что для данного соотношения диаметров инструмента и обрабатываемой детали характер изменения формы обработанной поверхности (на «бугор») соответствует увеличению выпуклости независимо от кинематических параметров настройки станка. Это объясняется тем, что при принятых значениях кинематических параметров настройки использовался обычный инструмент, рабочий слой которого состоял из полировальных элементов «Аквапол» с приблизительно постоянным значением коэффициента заполнения поверхности, усугубляющий неравномерность износа. При полировании прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем, размеры которых не превышают  $D_1/3$ , в соответствии с описанной технологией точность их формообразования  $N_x \leq (1/3)^2 N \approx 0,2$  значительно повышается.

**Выводы.** Исследованы закономерности образования формы обрабатываемых плоских поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из кристаллического кварца в процессе полирования. На основе обобщенной физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама, расчета скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по рабочей поверхности инструмента, усредненной по кинематическим параметрам, получены зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон, характеризующие эволюцию формы полированной поверхности и величину отклонения от

плоскостности. Результаты исследования влияния кинематических параметров на точность геометрической формы обрабатываемой поверхности позволили определить их наиболее рациональные значения, при которых достигается требуемая точность формообразования плоских поверхностей при полировании. Результаты теоретического анализа отклонения формы поверхностей деталей электронной техники и оптических систем подтверждены экспериментальными данными.

#### Список литературы

1. Поперенко Л.В., Філатов Ю.Д. Технология обработки оптических поверхонь: Навчальний посібник для студентів фізичного факультету. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2004. – 166 с.
2. Філатов Ю.Д. Моделювання процесів механічної обробки матеріалів: навч. посіб. / Ю.Д. Філатов. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 176 с.
3. Vukkadala P., Turner K.T., Sinha J.K. Impact of Wafer Geometry on CMP for Advanced Nodes // J. Electrochem. Soc. – 2011. – Vol. 158. – No. 10. – P.1002–1009.
4. Lee H.S., Jeong H.D., Dornfeld D.A., Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO<sub>2</sub> chemical mechanical polishing (CMP) processes // Precision Engineering. – 2013. – Vol. 37. – P. 483–490.
5. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou, Masakazu Fujimoto. Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher / International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – Vol. 77. – P. 93–102.
6. Budnikov A.T., Vovk E.A., Kanishchev V.N., Krivonogov S.I. Investigation of residual stresses in sapphire plates after grinding and polishing // Functional Materials. – 2012. – Vol. 19. – No. 4. – P. 478–482.
7. Golabczak M. Polishing of Hard Machining Semiconductor Materials Made of Silicon Carbide // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 15. – No. 1. – P. 81–93.

8. Hui Deng, Kenji Hosoya, Yusuke Imanishi, Katsuyoshi Endo, Kazuya Yamamura. Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO<sub>2</sub> slurry // Electrochemistry Communications. – 2015. – Vol. 52. – P. 5–8.
9. Asghar K., Qasim M., and Das D. Effect of Polishing Parameters on Chemical Mechanical Planarization of C-Plane (0001) Gallium Nitride Surface Using SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Abrasives // ECS J. Solid State Sci. Technol. – 2014. – Vol. 3. – No 8. – P. 277–284.

#### References (transliterated)

1. Poperenko L., Filatov Y. (2004). *Technology of optical surfaces: A manual for students of physical faculty*. Kiev: Publishing and Printing Center "Kyiv University". p166.
2. Filatov Y. (2012). *Modeling of machining material*. Kiev: NTUU "KPI". p176.
3. Vukkadala P., Turner K., Sinha J. (2011). Impact of Wafer Geometry on CMP for Advanced Nodes. *Electrochem. Soc.* 158 (10), p1002–1009.
4. Lee H., Jeong H., Dornfeld D. (2013). Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO<sub>2</sub> chemical mechanical polishing (CMP) processes. *Precision Engineering*. 37 (-), p483–490.
5. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou, Masakazu Fujimoto. (2014). Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 77 (-), p93–102.
6. Budnikov A., Vovk E., Kanishchev V., Krivonogov S. (2012). Investigation of residual stresses in sapphire plates after grinding and polishing. *Functional materials*. 19 (4), p478–482.
7. Golabczak M. (2011). Polishing of Hard Machining Semiconductor Materials Made of Silicon Carbide. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 15 (1), p81–93.
8. Hui Deng, Kenji Hosoya, Yusuke Imanishi, Katsuyoshi Endo, Kazuya Yamamura. (2015). , Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO<sub>2</sub> slurry. *Electrochemistry Communications*. 52 (-), p5–8.
9. Asghar K., Qasim M., Das D. (2014). Effect of Polishing Parameters on Chemical Mechanical Planarization of C-Plane (0001) Gallium Nitride Surface Using SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Abrasives. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 3 (8), p277–284.

Поступила (received) 12.11.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Формоутворення плоских оптичних поверхонь при поліруванні / Ю.Д. Філатов, В.А. Ковальов, О.Я. Юрчишин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 34–37. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

**Формообразование плоских оптических поверхностей при полировании / Ю.Д. Філатов, В.А. Ковалев, О.Я. Юрчишин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 34–37. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

**Shaping planar optical surface during polishing / Y. Filatov, V. Kovalev, O. Yurchyshyn** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.34–37. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Філатов Юрій Данилович** – доктор технічних наук, професор, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ; тел.: (044) 379-11-09; e-mail: filatov@ism.kiev.ua.

**Філатов Юрий Данилович** – доктор технических наук, профессор, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 379-11-09; e-mail: filatov@ism.kiev.ua..

**Filatov Yuriy** – Doctor of Sciences (High Ph. D.), V. Bakul Institute for Superhard Materials, Kyiv, tel.: (044) 379-11-09; e-mail: filatov@ism.kiev.ua.

**Ковальов Віктор Андрійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: wikkov@gmail.com

**Ковалев Виктор Андреевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования станков и машин НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: wikkov@gmail.com

**Kovalev Viktor** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61; e-mail: wikkov@gmail.com.

**Юрчишин Оксана Ярославівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

**Юрчишин Оксана Ярославовна** - кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования станков и машин НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

**Yurchyshyn Oksana** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net