

УДК 621.91.678.5

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ НЕЖОРСТКИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПЗИТИВ ЗА ІНТЕГРОВАНОЮ КІНЕМАТИЧНОЮ СХЕМОЮ РІЗАННЯ

Самчук В.В., Прилипко А.Л.

Українська інженерно-педагогічна академія

Полімерні композитні матеріали дозволяють удосконалити різні конструкції в різноманітних галузях промисловості. Однак значна номенклатура конструкцій із полімерних композитів має більш пружні властивості, чим з металів та їхніх сплавів, що ускладнює їх механічну обробку, зокрема виробів циліндричної форми, причому ключовим інструментом для призначення найвигідніших технологічних параметрів та раціональних режимів різання виробів такого класу є математичне моделювання процесу обробки. Таким чином у статті запропонована узагальнена математична модель процесу обробки нежорстких циліндричних виробів за інтегрованою кінематичною схемою різання, що дозволяє взаємокомпенсувати сили різання та крутний момент, що підвищить якість оброблених поверхонь і продуктивність процесу різання за рахунок забезпечення таких умов обробки, при яких розмах коливань виробу в зоні різання не перевищував розміру ровінга, що армує виріб у напрямку нормалі до обробленої поверхні.

**Ключові слова:** математична модель процесу обробки, інтегрована кінематична схема різання, циліндричні вироби, полімерні композитні матеріали.

**Постановка проблеми.** Збільшення обсягів виробництва композитних матеріалів, серед яких особливе місце посідають композити на основі полімерних речовин, є однією з тенденцій розвитку сучасного машинобудування. Вироби із полімерних композитних матеріалів (ПКМ) знаходять широке застосування у сфері матеріального виробництва, головним чином у будівельній та транспортній галузях. Однак більш широке впровадження виробів із ПКМ стримується саме через складність забезпечення високої ефективності їх обробки різанням, особливо виробів, конструкція яких володіє значною анізотропною пружністю [1].

Одним зі спільних недоліків принципів кінематичних схем різання (КСР) циліндричних поверхонь (рис. 1) є однобічний напрям дії складових сили різання ( $P_x$  – осьові,  $P_n$  – нормальна,  $P_t$  – дотична складова), які утворюють пружну деформацію виробу по напрямку дії, загальна пружна деформація якого становить

$$f_{\max}^o = \sqrt{[f_x^o]^2 + [f_y^o]^2 + [f_z^o]^2} + f_\phi^o,$$

де  $f_x^o, f_y^o, f_z^o$  та  $f_\phi^o$  – пружні лінійні деформації виробу за напрямком координатних осей  $x_o, y_o, z_o$  та кутова щодо точки  $O_o$ . При обертанні виробу ці пружні переміщення утворюють розмах вимушених коливань, у результаті чого виникає періодична зміна товщини зрізу, що є причиною зниження якісних показників оброблених поверхонь в плані шорсткості  $Rz$ , мкм; ворсистості  $K\phi$ , %; глибини дефектного шару  $M$ , мкм; ступеню деструкції поверхневого шару  $N$ , спін/гр; похибка геометричної форми  $\Phi$ , мкм [2].

Для зменшення пружних деформацій виробу використовують додаткові опори (люнети), прикладають розтягувальні зусилля, керують режимами різання та напрямком дії головної складової сили різання, а для прогнозування необхідних умов різання розробляють математичні моделі процесу обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемою обробки нежорстких виробів та математичного опису процесу різання займався І.Г. Жарков, В.А. Кудінов, В.О. Полетаєв, А.І. Бохонський, С.О. Васін, Б.М. Базров,

А.П. Соколовський, В.М. Подураєв, О.І. Каширін та інші [2].

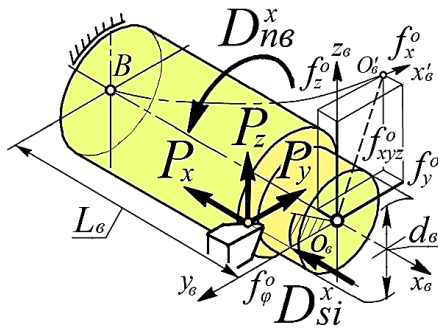


Рис. 1. Схема дії складових сили різання та пружні деформації виробу за принциповою КСР

У значній кількості із запропонованих математичних моделей процес обробки розглядається нелінійною, неоднорідною системою рівнянь, що включає перемінні з запізненням аргументом. Але якщо не враховувати такі явища, як тертя, можливість виходу різального елемента з зони обробки та інші структурні нелінійності, то система рівнянь може бути зведена до лінійного.

Аналіз процесу обробки за допомогою лінійних моделей досліджувались у роботах Г.І. Грановського, Y. Altintas, M. Weck, S.D. Merdol. Значним недоліком цих моделей є те, що з їхньою допомогою можна лише приблизно спрогнозувати зони виникнення небажаних вібрацій у технологічній системі, а також оцінити якість одержуваної поверхні в зонах стійких параметрів процесу в стаціонарному режимі [2].

У роботах Hanna, Tobias, Minis, Yanushevsky, Zhao, Balachandran розглядається моделювання процесу фрезерування з урахуванням нелінійності сили різання і періодичного виходу РЕ з зони різання. Рішення, приведені в цих роботах, були отримані розкладанням у ряд, що значно спрощує аналіз стійкості, але не дозволяє оцінити якість підсумкової обробленої поверхні.

Для загального випадку процесу фрезерування достовірні результати можна одержати шляхом чисельного інтегрування повної системи рівнянь зведеної моделі до нелінійних диференціальних рівнянь із запізнілим аргументом. Існує ряд досліджень, що були спрямовані на чисельне моделювання процесів фрезерування. Наприклад, у роботах Kline, DeVor, Shareef приведений алгоритм чисельного моделювання з метою прогнозування якості одержуваної поверхні за рахунок статичних переміщень у системі «інструмент – деталь» без врахування регенеративного ефекту.

Також є цілий ряд дослідження, присвячених чисельному аналізу пошуку зон прийнятних умов різання. Так у роботі Plusty показаний алгоритм одержання зон стійкості з урахуванням нелінійної природи сил різання і застосував отриману модель для побудови зон прийнятних умов різання при високошвидкісній обробці різанням. Чисельному моделюванню процесів фрезерування нежорстких деталей присвячені дослідження Montgomery і Y. Altintas, Lee, Marc L. Campomaness [2].

Постановка задачі. Із великої кількості досліджень, присвячених побудові математичних моделей процесу лезвівної обробки, більшість з яких

присвячена одноінструментальній обробці, а процесу багатоінструментальної, за умовою забезпечення взаємокомпенсації силових факторів досі не вирішена. Тому метою роботи є розробити загальнену математичну модель процесу механічної обробки циліндричного виробу за інтернованою КСР, яка спрямована на взаємокомпенсацію сили різання та крутного моменту, діючих на виріб, що підвищить якість оброблених поверхонь і продуктивність процесу різання за рахунок забезпечення таких умов обробки, при яких розмах коливань виробу в зоні різання не перевищував розміру рівніща  $R_{max}^o < d_p$ , що армує виріб у напрямку нормалі до обробленої поверхні (рис. 2).

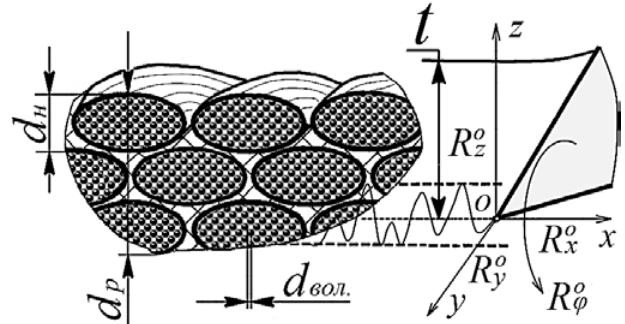


Рис. 2. Умова прийнятного різання виробів із ПКМ, де  $d_p$  – розмір рівніща в стиснутому стані;  $d_n$  – нитки;  $d_{вол}$  – волокна;  $R_z^o, R_x^o, R_y^o$  та  $R_\phi^o$  – розмах коливань за напрямком осі  $x, y, z$  та крутний розмах коливань щодо точки  $O$

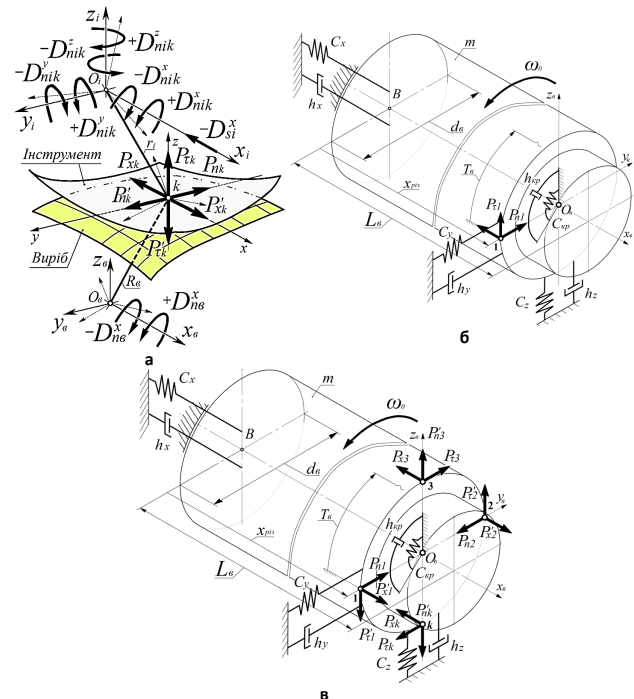


Рис. 3. Схема різання:

а – загальна КСР циліндричного виробу з напрямками дії складових сили різання, де  $D_{nib}, (D_{nib}, D_{si})$  – кінематичний рух різання, обертання виробу, (обертання різального інструмента, подача інструмента) [3, 4];

б – розрахункова динамічна схема процесу різання циліндричного виробу за умовою повної взаємокомпенсації складових сил різання [2];

в – розрахункова динамічна схема процесу різання циліндричного виробу за принциповою КСР

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

В умовах динамічної рівноваги виробу із урахуванням дії на неї складових сили різання маємо систему диференціальних рівнянь нестационарних коливань (1), що описують поведінку пружного виробу у відповідності до принципової розрахункової схеми (рис. 3, б та рис. 3, в), де 1, 2, 3...k кількість зон різання (рис. 3, а), що становлять  $k=2n$ , ( $n$  – довільне ціле число,  $n \geq 2$ ).

$$\begin{cases} m_x \frac{d^2 x}{dt^2} + h_x \frac{dx}{dt} + C_x x(t) = \sum_{k=1}^n P_{xk}(t) \\ m_y \frac{d^2 y}{dt^2} + h_y \frac{dy}{dt} + C_y y(t) = \sum_{k=1}^n P_{yk}(t) \\ m_z \frac{d^2 z}{dt^2} + h_z \frac{dz}{dt} + C_z z(t) = \sum_{k=1}^n P_{zk}(t) \\ J_p \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + h_{kp} \frac{d\varphi}{dt} + C_{kp} \varphi(t) = \sum_{k=1}^n M_{sk}(t) \end{cases}, \quad (1)$$

де  $m_x, m_y, m_z$  – маса виробу, кг;  $h_x, h_y, h_z$  – коефіцієнт опору переміщення (демпфірування), Н·с/мм,  $h_i = \frac{\delta \sqrt{C_i m_i}}{2\pi}$ , де  $\delta$  – коефіцієнт розсіювання енергії, щодо довжини виробу  $L_6$ ;  $C_x, C_y$  та  $C_z$  – коефіцієнт жорсткості виробу щодо осей  $x_0, y_0$  та  $z_0$ , Н/мм;  $J_p$  – полярний момент інерції перерізу виробу, мм<sup>4</sup>;  $h_{kp}$  – коефіцієнт демпфірування при скручуванні, Н·с/мм;  $C_{kp}$  – коефіцієнт жорсткості при скручуванні, Н/мм.

Сума дії складових сил різання становить за принциповою КСР:

$$\sum_{k=1}^n P_{xk}(t) = P'_{x1}(\varphi'); \quad \sum_{k=1}^n P_{yk}(t) = (P'_{n1}(\varphi') - P'_{x1}(\varphi')) L_6 d_6 \cdot 0,5;$$

$$\sum_{k=1}^n P_{zk}(t) = -P'_{z1}(\varphi'); \quad \sum_{k=1}^n M_{sk}(t) = P'_{r1}(\varphi') d_6 \cdot 0,5.$$

За інтегрованою КСР:

$$\sum_{k=1}^n P_{xk}(t) = P'_{x1}(t) + P'_{x2}(t) - P'_{x3}(t) - P'_{x4}(t);$$

$$\sum_{k=1}^n P_{zk}(t) = (P'_{n3}(t) - P'_{n4}(t) - P'_{r1}(t) + P'_{r2}(t)) + (-P'_{r3}(t) + P'_{r4}(t)) 0,5 L_6 d_6;$$

$$\sum_{k=1}^n M_{sk}(t) = d_6 (P'_{r1}(t) + P'_{r2}(t) - P'_{r3}(t) - P'_{r4}(t)) 0,5;$$

$$\sum_{k=1}^n M_{sk}(t) = d_6 (P'_{r1}(t) + P'_{r2}(t) - P'_{r3}(t) - P'_{r4}(t)) 0,5.$$

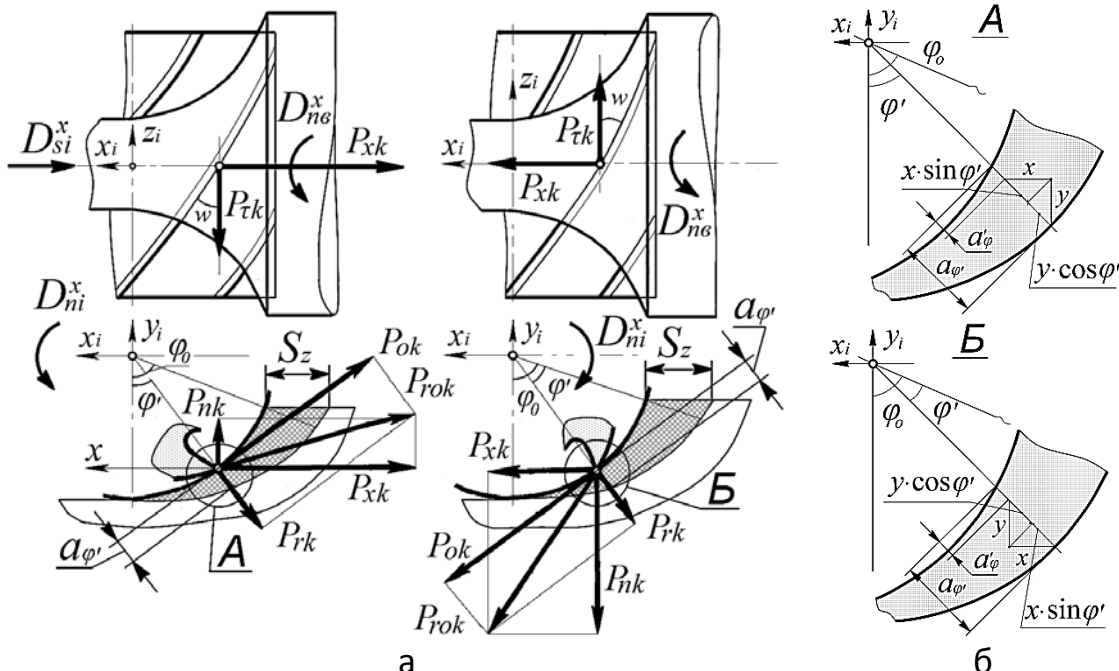


Рис. 5. Схема напрямку дії складових сили різання та зміни товщини шару, що зрізуються: а – при зустрічному; б – при побіжному фрезеруванні

Загальним рішенням системи рівнянь (1) є

$$\begin{cases} x(t) = \left( \sum_{k=1}^n P_{xk}(t) \cos \left( \omega t + \arctg \left( \frac{2h_x/2m_x\omega_0}{C_x/m_x - \omega_0^2} \right) \right) \right) / \left( m_x \sqrt{\left( \frac{C_x}{m_x} - \omega_0^2 \right)^2 + \frac{4h_x}{2m_x\omega_0^2}} \right) \\ y(t) = \left( \sum_{k=1}^n P_{yk}(t) \cos \left( \omega t + \arctg \left( \frac{2h_y/2m_y\omega_0}{C_y/m_y - \omega_0^2} \right) \right) \right) / \left( m_y \sqrt{\left( \frac{C_y}{m_y} - \omega_0^2 \right)^2 + \frac{4h_y}{2m_y\omega_0^2}} \right) \\ z(t) = \left( \sum_{k=1}^n P_{zk}(t) \cos \left( \omega t + \arctg \left( \frac{2h_z/2m_z\omega_0}{C_z/m_z - \omega_0^2} \right) \right) \right) / \left( m_z \sqrt{\left( \frac{C_z}{m_z} - \omega_0^2 \right)^2 + \frac{4h_z}{2m_z\omega_0^2}} \right) \\ \varphi(t) = \left( \sum_{k=1}^n M_{sk}(t) \cos \left( \omega t + \arctg \left( \frac{2h_z/2J_p\omega_0}{C_{kp}/J_p - \omega_0^2} \right) \right) \right) / \left( J_p \sqrt{\left( \frac{C_{kp}}{J_p} - \omega_0^2 \right)^2 + \frac{4h_z}{2J_p\omega_0^2}} \right) \end{cases}. \quad (2)$$

Відповідно загальний розмах коливань становить

$$R_{\max}^0(t) = \sqrt{[x(t)]^2 + [y(t)]^2 + [z(t)]^2} + R_\varphi^0(t) < d_p.$$

До запропонованої математичної моделі розроблено та запатентовано конструкцію супорта [5], що забезпечує інтегровану КСР на базі токарно-гвинторізного верстата (рис. 4). До проведення досліджень призначено технологічне та інструментальне оснащення та діапазон режимних параметрів обробки.

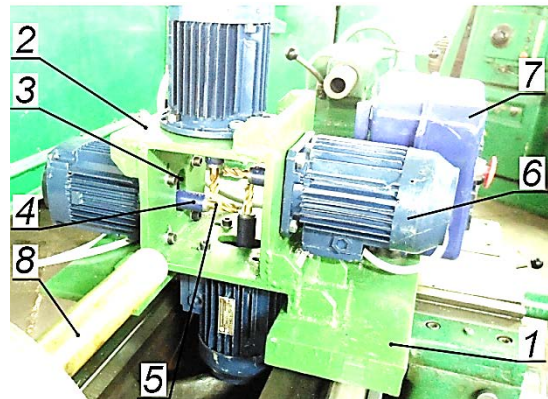


Рис. 4. Супорт токарного верстата: 1 – кріпильна плита, 2 – корпус, 3 – наскрізні пази, 4 – цангові патрони, 5 – кінцеві фрези, 6 – електродвигуни, 7 – пульт керування; 8 – заготовка із склопластику [6]

Складові сили різання за напрямком дії на виріб становлять:

$$\begin{cases} \bar{P}_{rk}(\varphi') = \pm \bar{P}_{ok}(\varphi') \cos \varphi' \pm \bar{P}_{rk}(\varphi') \sin \varphi' \\ \bar{P}_{nk}(\varphi') = \pm \bar{P}_{ok}(\varphi') \sin \varphi' \pm \bar{P}_{rk}(\varphi') \cos \varphi' \\ \bar{P}_{\tau k}(\varphi') = \pm \bar{P}_{ok}(\varphi') \cdot \text{tg}(w) \end{cases} \quad (3)$$

Дотична до окружності фрези складова  $P_{ok}$ , сили різання задається, як  $P_{ok}(\varphi') = C_p V_0^{xp} [a_{\varphi'} + y((t-t_{eid})-T-\tau)\cos\varphi' - y((t-t_{eid})-\tau)\cos\varphi' + x((t-t_{eid})-T-\tau)\sin\varphi' - x((t-t_{eid})-\tau)\sin\varphi']^{yp} t_0^{zp}$ , тоді  $P_{rk}(\varphi') = K \cdot P_{oi}(\varphi')$ , при  $a_{\varphi'} + y((t-t_{eid})-T-\tau)\cos\varphi' - y((t-t_{eid})-\tau)\cos\varphi' + x((t-t_{eid})-T-\tau)\sin\varphi' - x((t-t_{eid})-\tau)\sin\varphi' > 0$ ;  $P_{ok}(\varphi') = 0$  при  $a_{\varphi'} + y((t-t_{eid})-T-\tau)\cos\varphi' - y((t-t_{eid})-\tau)\cos\varphi' + x((t-t_{eid})-T-\tau)\sin\varphi' - x((t-t_{eid})-\tau)\sin\varphi' \leq 0$ , де  $C_p$  – узагальнений коефіцієнт пропорційності, що залежить від ПКМ, що обробляється;  $x_p, y_p, z_p$  – показники степеня;  $\tau$  – час запізнювання,  $\tau \in [4 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-4}]$ , с;  $y$  та  $x$  – величини зміни товщини шару, що зрізується в радіальному та осьовому напрямках відповідно;  $K$  – коефіцієнт,  $K=0,2\dots0,3$ ;  $t$  – час контакту зубця фрези з виробом, с;  $t_{eid}$  – час відставання роботи фрези одна щодо іншої, с;  $\varphi'$  – кут різання,  $\varphi' = \omega_{\phi}(t-t_{eid}) - (q-1)2\pi/z$ ;  $a_{\varphi'}$  – товщина, що зрізується,  $a_{\varphi'} = S_z \sin \varphi'$ , звідки маємо при побіжній схемі фрезерування

$$\begin{cases} a_{\varphi'} = S_z \sin \left( \omega_{\phi}(t-t_{eid}) - \frac{(q-1)2\pi}{z} \right) \text{ при } 2\pi(k+1) + \frac{(q-1)2\pi}{z} - \varphi_0 \leq \omega_{\phi}(t-t_{eid}) \leq 2\pi(k+1) + \frac{(q-1)2\pi}{z} \\ a_{\varphi'} = 0 \text{ при } 2\pi k + \frac{(q-1)2\pi}{z} < \omega_{\phi}(t-t_{eid}) < 2\pi(k+1) + \frac{(q-1)2\pi}{z} - \varphi_0 \end{cases}$$

та при зустрічній схемі фрезерування

$$\begin{cases} a_{\varphi'} = -S_z \sin \left( \omega_{\phi}(t-t_{eid}) - \frac{(q-1)2\pi}{z} \right) \\ \text{при } 2\pi k + \frac{(q-1)2\pi}{z} \leq \omega_{\phi}(t-t_{eid}) \leq 2\pi k + \frac{(q-1)2\pi}{z} + \varphi_0 \\ a_{\varphi'} = 0 \text{ при } 2\pi k + \frac{(q-1)2\pi}{z} - \varphi_0 < \omega_{\phi}(t-t_{eid}) < 2\pi(k+1) + \frac{(q-1)2\pi}{z} \end{cases};$$

$\varphi_0$  – кут контакту фрези з виробом;  $k$  – номер обороту фрези;  $z$  – число зубців;  $q$  – номер зубця фрези;  $T$  – час повороту фрези на один зуб, с;  $\omega_{\phi}$  – кутова швидкість фрези, рад/с.

За результатами експериментів встановлено зміну величин сили різання щодо режимів різання при обробці циліндричною фрезою виробу із призначено оброблюваний матеріал – склопластик із подовжньо-неперервним – «≡», тангенціальним – «⊙» та полотняним армуванням – «#». Після апроксимації результатів в програмі MS

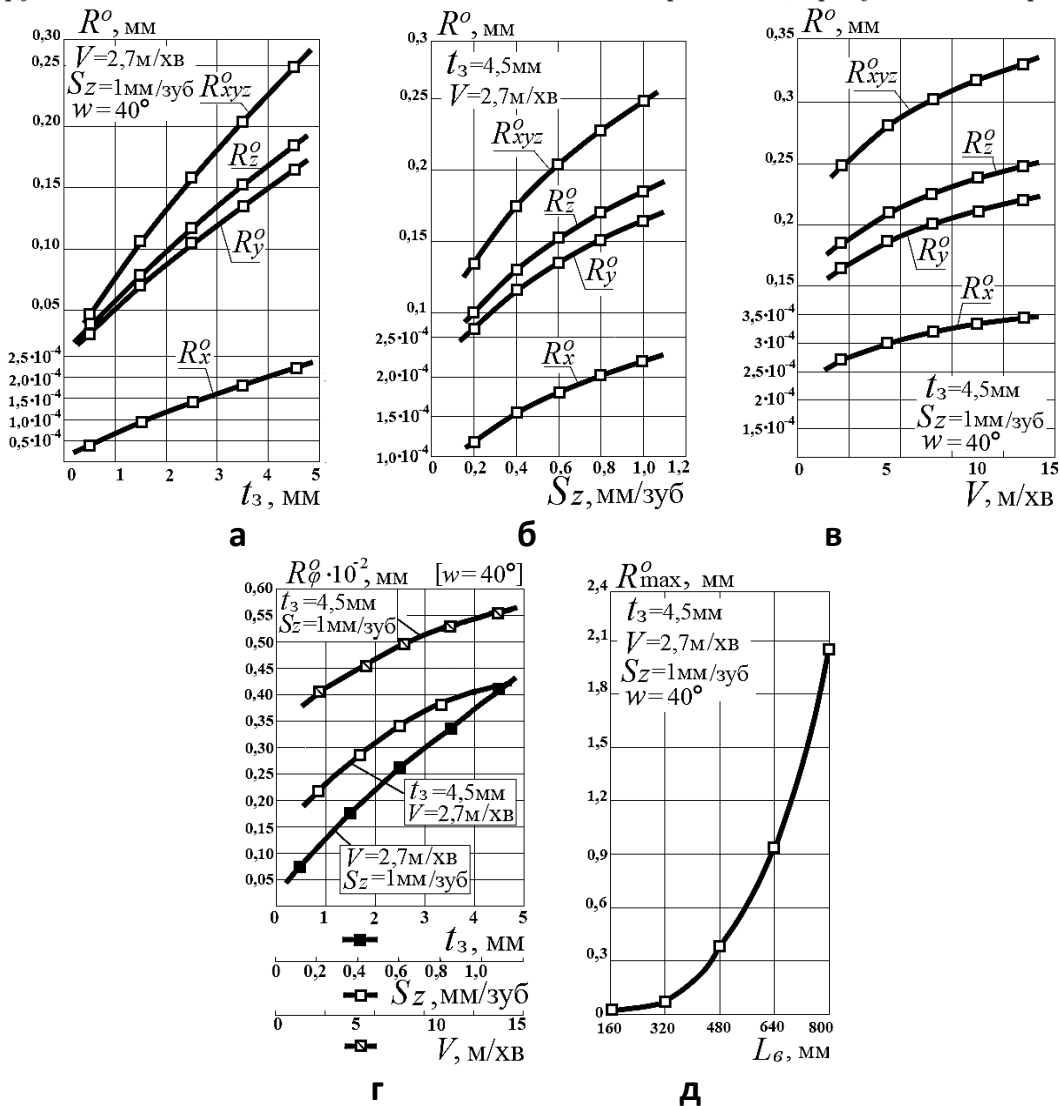


Рис. 6. Розмах коливань виробу за принциповою КСР при зміні: а –  $t_3$ , мм; б –  $S_z$ , мм/зуб; в –  $V$ , м/хв; г – розмах крутих коливань; д – загальний розмах коливань щодо довжини виробу (зміна жорсткості виробу)

Ехсел визначено емпіричну їхню закономірність та обґрунтовано умову взаємокомпенсації сили різання за зустрічною «з» та побіжною «п» схемами різання:

$$\begin{cases} P_{\#}^z = 10,3 \cdot V^{0,09} \cdot S_z^{0,28} \cdot t_3^{0,61} \\ P_{\#}^n = 12 \cdot V^{0,13} \cdot S_z^{0,35} \cdot t_3^{0,76} \\ P_{\#}^z = P_{\#}^n \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{\#}^z = 10,6 \cdot V^{0,11} \cdot S_z^{0,3} \cdot t_3^{0,7} \\ P_{\#}^n = 11,1 \cdot V^{0,11} \cdot S_z^{0,32} \cdot t_3^{0,72} \\ P_{\#}^z = P_{\#}^n \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\#}^z = 9,5 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,33} \cdot t_3^{0,79} \\ P_{\#}^n = 11 \cdot V^{0,18} \cdot S_z^{0,38} \cdot t_3^{0,82} \\ P_{\#}^z = P_{\#}^n \end{cases}$$

За результатами чисельного розрахунку математичної моделі процесу різання побудовано криві коливань циліндричного виробу із «#» армуванням щодо точки  $O_c$  в поперечній, поздовжній площинах, крутильних коливань та їх загальна сума при обробці за принциповою та інтегрованою КСР. Побудовано діаграми (рис. 6, рис. 7) зміни розмаху коливань  $R^o$  циліндричного виробу за зміною режимів різання та його жорсткості (довжини вильоту виробу із затискного пристосування).

Установлено, що зміна режимних параметрів пропорційно впливає на величину розмаху коливань, причому  $R^o$  за інтегрованою КСР менший у порівнянні від  $R^o$  за принциповою КСР. Однак, якщо в умову врівноваження прийняти, що фрези працюють у різному часовому циклі одна щодо іншої, то  $R^o$  виробу збільшується і досягає пікового значення при  $(\varphi'_3)\varphi'_1/\varphi'_2(\varphi'_4)=0,5$ , але в підсумку  $R^o_{max}$  менший, ніж за принциповою КСР, що перш за все обумовлено розподілом припуску на обробку на чотири інструмента, а ті сили, що виникають, урівноважуються.

Проведено експерименти з механічної обробки щодо розрахованих величин розмаху коливань виробу за запланованими режимами різання та параметрів обробки. У результаті чого встановлено, що низька жорсткість виробу із ПКМ впливає на зниження якісних показників оброблених поверхонь у випадку різання за принциповою КСР, а в разі, якщо  $R^o_{max} > d_p$ , то практично здійснити різання неможливо або утворюється вкрай неякісна поверхня, яка не підлягає визначенню чітких значень якісних показників. У разі, коли  $R^o_{max} < d_p$ , якісні значення поверхні

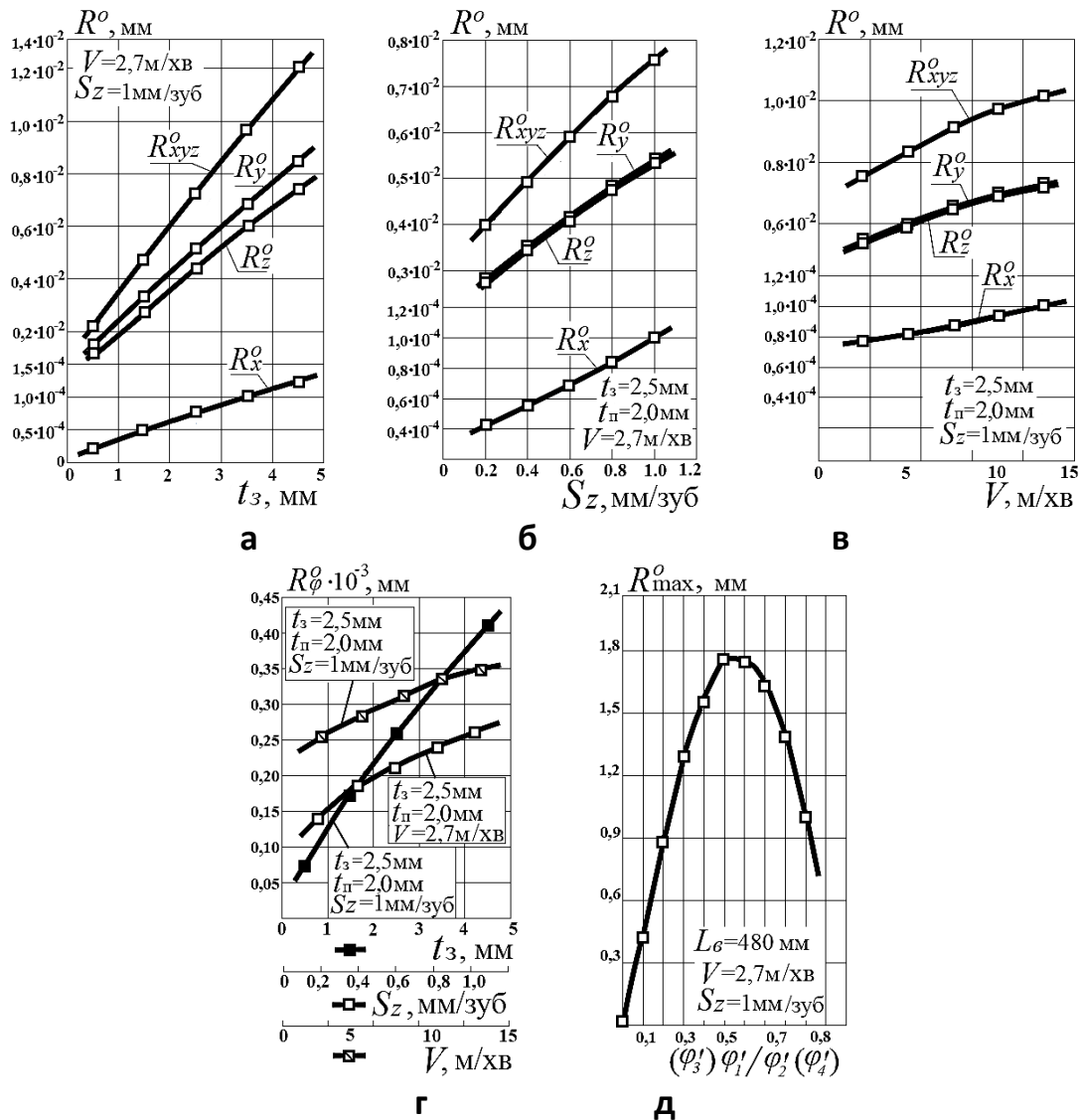


Рис. 7. Розмах коливань виробу за інтегрованою КСР при зміні: а –  $t_3$ , мм; б –  $S_z$ , мм/зуб; в –  $V$ , м/хв; г – розмах крутих коливань; д – загальний розмах коливань щодо зміни часового циклу роботи фрез

при варіюванні жорсткості виробу залишаються в щільних межах прогнозування від номінального значення незалежно від схеми армування, однак істотно впливає взаємне положення напрямку армування щодо вектора швидкості різання, так зразки з «⊙» та «#» армуванням мали гіршу якість поверхонь ніж із «=».

Отримані якісні і технологічні показники процесу обробки за інтегрованою КСР зведено до одного критерію  $d_i$  за допомогою функції бажаності Харрінгтона (рис. 8), яка аналітично задається залежністю

$$d_i = \exp[-\exp(-y')],$$

де  $y' = Ky_i + b$ , де  $K$  та  $b$  константи, обумовлені з граничних умов:

$$\begin{cases} Ky_{i\min} + b = -1,1 \\ Ky_{i\max} + b = 3 \end{cases}$$

Узагальнений критерій ефективності  $D$  являє собою середньогометричне індивідуальних показників  $d_i$   $D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \dots d_n}$  (рис. 8).

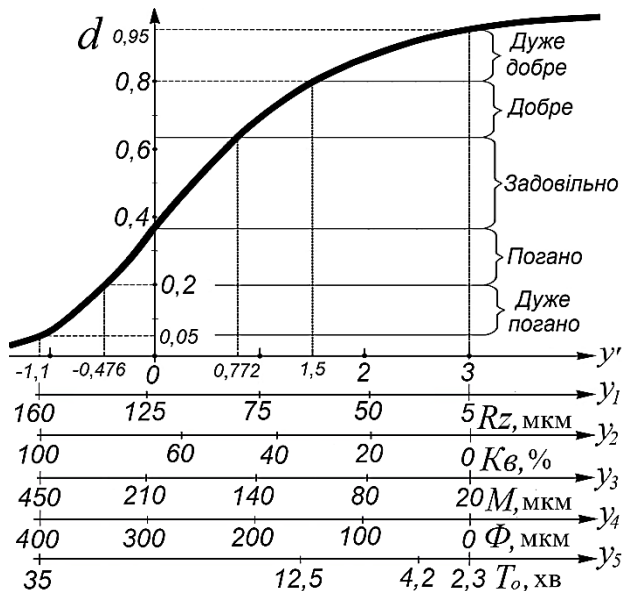
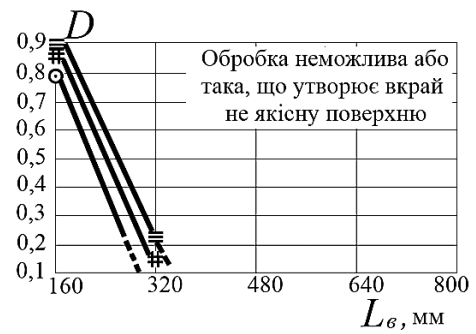


Рис. 8. Вид функції з дослідження ефективності процесу різання нежорстких виробів із ПКМ

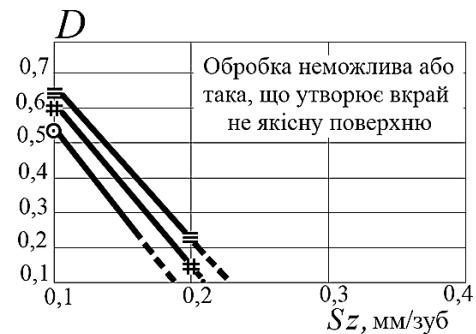
Результати дослідження показали більше розсіювання показників якості оброблених поверхонь за інтегрованою КСР, ніж за принциповою, що зменшує імовірність одержання конкретного значення узагальненого критерію ефективності, однак значення залишаються в межах бажаного рівня, тому прогнозування ефективності обробки визначається через імовірність випадкової величини із застосуванням нормального закону розподілу (закон Гаусса). Імовірність отримання бажаного узагальненого критерію ефективності  $D$ , який задано в інтервалі в межах 20% від кращого значення  $D$  при обробці виробу довжиною  $L_e=160$  мм та за допомогою способу інтерполяції визначили інтервал бажаного критерію ефективності  $D$  із результатів обробки виробів довжиною  $L_e=320$  мм,  $L_e=480$  мм,  $L_e=640$  мм та  $L_e=800$  мм.

Установлено, що головним фактором із режимів різання зниження ефективності за інтегрованою КСР є подача  $S_z$ , що відображає продуктивність процесу різання, на відміну від обробки

за принциповою КСР, при якій є саме пружна піддатливість виробу із ПК (рис. 11).

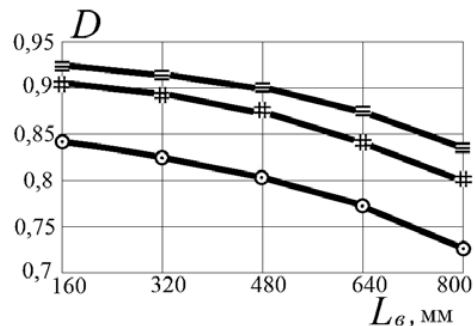


а

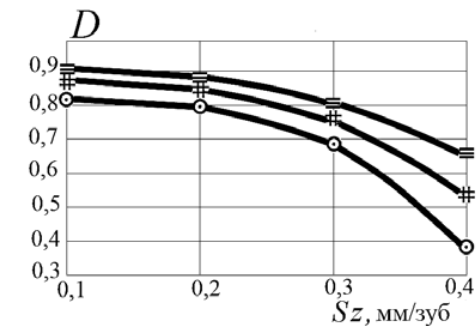


б

Рис. 9. Узагальнений критерій ефективності обробки за принциповою КСР щодо: а – довжини вильоту  $L_e$ ; б – подачі  $S_z$ , яка відображає продуктивність різання ( $L_e=320$  мм)



а



б

Рис. 10. Узагальнений критерій ефективності обробки за інтегрованою КСР щодо: а – довжини вильоту  $L_e$ ; б – подачі  $S_z$  ( $L_e=320$  мм)

**Висновок.** Розроблено узагальнену математичну модель процесу обробки за інтегрованою кінематичною схемою різання, яка описує по-

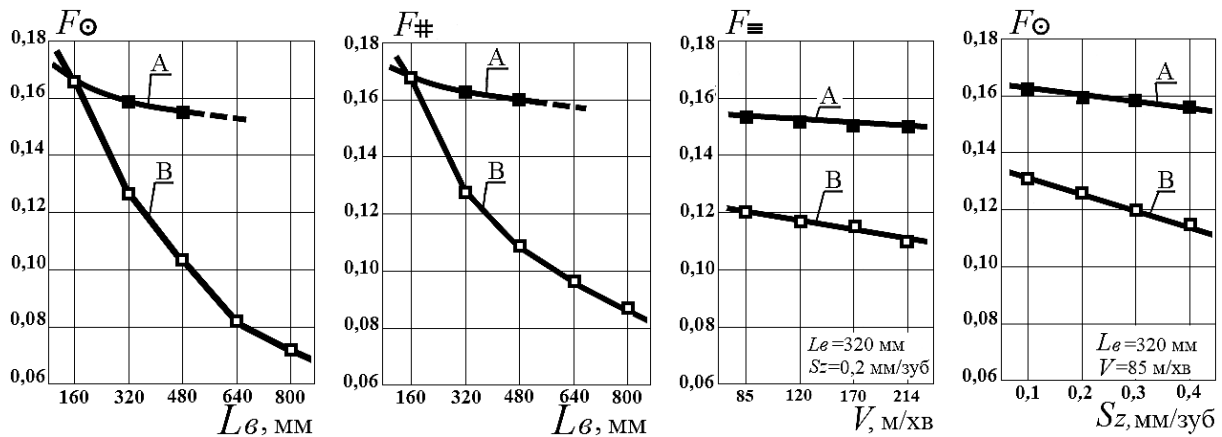


Рис. 11. Імовірність отримання бажаного узагальненого критерію ефективності процесу різання за «А» – принциповою та «В» – інтегрованою КСР

водження нежорсткого циліндричного виробу із ПКМ під дією складових сил різання.

Математична модель дозволяє визначити раціональні режими різання на умові розмаху коливань у зоні різання, який не повинен перевищувати розміру ровінга, що армує виріб у напрямку нормалі до обробленої поверхні, чим забезпечується отримання необхідної якості поверхневого шару.

Експериментальними дослідженнями, виконаними на запатентованій установці модернізованого токарно-гвинторізного верстата, встановлено:

- збільшення розмаху коливань виробу із ПКМ впливає на зниження якості (шорсткість, ворсистість, глибина дефектного шару, похибка геометричної форми) оброблених поверхонь у разі обробки за принциповою КСР;

- якщо величина розмаху коливань у зоні різання перевищує діаметр ровінга, то якість оброблених поверхонь неможливо адекватно визначити, причому розсіювання якісних показників при варіюванні жорсткості виробу залишаються

в межах реального прогнозування від номінального значення незалежно від схеми армування, однак суттєво впливає взаємне положення напрямку армування щодо вектора швидкості різання. Зразки із полотняним та спіральним армуванням мали гіршу якість оброблених поверхонь, ніж із повздовжнім армуванням;

- різання інтегрованою КСР зменшує в 2,5-3,5 рази імовірність отримання кращих показників якості, ніж за принциповою КСР, однак значення залишаються в межах прийняттого рівня для адекватного оцінювання якісних показників – шорсткість у межах  $R_z=20-60 \text{ мкм}$  (різання принциповою КСР  $R_z=200-350 \text{ мкм}$ , при таких самих технологічних параметрах обробки), ворсистість  $K_v=5-20\%$  (50-90%), глибина дефектного шару  $M=80-120 \text{ мкм}$  (220-360 мкм), похибка геометричної форми  $\Phi=150-230 \text{ мкм}$  (800-1200 мкм);

- головним фактором зниження ефективності формування поверхневого шару при різанні за інтегрованою КСР є подача інструменту на відміну від різання за принциповою КСР, при якій є саме пружна податливість виробу.

## Список літератури:

1. Тарасюк А.П. Расширение функциональных возможностей волокнистых полимерных композитов за счет разработки эффективных процессов механической обработки: Дис. на соиск. учен. степ. д-р техн. наук. Спец. 05.03.01 / Тарасюк А.П. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 485 с.
2. Самчук В.В. Интеграция кинематических схем резания для компенсации сил при обработке полимерных композитов: дис. канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / Володимир Володимирович Самчук; наук. керівник Тарасюк А.П.; Українська інженерно-педагогічна академія. – Харьков, 2016. – 184 с.
3. Самчук В.В. Створення кінематичних схем різання для механічної обробки нежорстких циліндричних виробів із полімерних композитів / В.В. Самчук // «Первый независимый научный вестник». – Київ: 2016. – Вып. 6. – С. 66-73.
4. Пат. 114573 України на корисну модель. МПК В23В 1/00. Спосіб розробки багатоінструментальних кінематичних схем різання для механічної обробки нежорстких циліндричних виробів / Самчук В.В., Тарасюк А.П., Сичов Ю.І., Прилипко А.Л.; заявник і патентовласник Укр. інж.-пед. акад. – № u201610318; заявл. 10.10.2016; опубл. 10.03.2017. Бюл. № 5.
5. Пат. 95065 Україна, МПК В23В 5/12. Пристрій для безцентрової обробки циліндричних виробів / Самчук В.В., Сичов Ю.І., Лях Б.Г.; заявник і патентовласник Укр. інж.-пед. акад. – № u201406899; заявл. 19.06.2014; опубл. 10.12.2014. Бюл. № 23.
6. Самчук В.В. Механічна обробка нежорстких виробів циліндричної форми із полімерних композитних матеріалів / В.В. Самчук // XLVIII (19-21.05.2015 р.) Науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників академії. Збірник тез доповідей: Ч. 3. – Харьков: Укр. інж.-пед. акад., 2015. – С. 35.

Самчук В.В., Прилипко А.Л.

Українська інженерно-педагогічна академія

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПО ИНТЕГРИРОВАННОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ РЕЗАНИЯ

### Аннотация

Полимерные композитные материалы позволяют усовершенствовать различные конструкции в разнообразных областях промышленности. Однако значительная номенклатура конструкций из полимерных композитов имеет более упругие свойства, чем из металлов и их сплавов, что усложняет их механическую обработку, в частности изделий цилиндрической формы, причем ключевым инструментом для назначения выгоднейших технологических параметров и рациональных режимов резания изделий такого класса является математическое моделирование процесса обработки. Таким образом в статье предложена обобщенная математическая модель процесса обработки нежестких цилиндрических изделий за интегрированной кинематической схеме резания, которая позволяет взаимокompенсировать силы резания и крутящий момент, что повысит качество обработанных поверхностей и производительность процесса резания за счет обеспечения условий обработки, при которых размах колебаний изделия в зоне резания не превышал размера ровинга, который армирует изделие в направлении нормали к обработанной поверхности.

**Ключевые слова:** математическая модель процесса обработки, интегрированная кинематическая схема резания, цилиндрические изделия, полимерные композитные материалы.

Samchuk V.V., Prylypko A.L.

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy

## MATHEMATICAL MODEL OF THE MACHINING PROCESS FOR NON-RIGID CYLINDRICAL PRODUCTS MADE OF POLYMER COMPOSITES ACCORDING TO THE INTEGRATED KINEMATIC SCHEME OF CUTTING

### Summary

Polymer composites allow improving various designs in diverse fields of industry. However, a great spectrum of designs made of polymer composites have more elastic properties than those made of metals and their alloys, which complicates their machining, in particular that of cylindrical products, and the key instrument for assigning most advantageous technological parameters and rational modes of cutting for this class of products is mathematical modeling of the machining process. Thus, the article proposes a generalized mathematical model of the machining process for non-rigid cylindrical products according to the integrated kinematic scheme of cutting allowing to mutually compensate cutting forces and torque and to improve the machined surface quality and efficiency of the cutting process due to the provision of relevant terms of machining, with peak-to-peak amplitude of products in the cutting area not exceeding the size of roving, which reinforces the product in the directions of normal to the machined surface.

**Keywords:** mathematical model of the machining process, integrated kinematic scheme of cutting, cylindrical products, polymer composites.