

**О.Ф. Саленко**, д.т.н., проф.<sup>1</sup>,

**С.П. Мельничук**<sup>1</sup>,

**А.Ю. Гаврушкевич**, к.т.н.<sup>1</sup>,

**В.Т. Щетинін**, к.т.н., проф.<sup>2</sup>,

**О.О. Ченчева**, к.т.н.<sup>2</sup>,

**Мохамед Р.Ф. Будар**, асп.<sup>2</sup>,

**П.П. Мельничук**, д.т.н., проф.<sup>3</sup>,

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<sup>1</sup>,*

*Кременчуцький національний університет імені Михайло Остроградського»<sup>2</sup>,*

*Державний університет «Житомирська політехніка»<sup>3</sup>*

## **ГІБРИДНІ ПРОЦЕСИ ОБРОБЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ: ТЕНДЕНЦІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ**

Сучасні композиційні матеріали на основі скляних і вуглецевих волокон володіють унікальним комплексом властивостей, що дозволяє їх із успіхом використовувати в аерокосмічній техніці, автомобілебудуванні, ядерній та тепловій енергетиці.

Мала вага, прогнозована анізотропія механічних властивостей, висока стійкість до впливів агресивних середовищ робить такі матеріали практично незамінними у сучасному машинобудуванні. Однак у той же час неоднорідність структури, міцність армувальних компонентів, їх висока абразивна спроможність, ускладнює обробку механічними або фізико-технічними методами, обумовлює активний пошук нових видів, методів і способів впливу з метою кінцевого формоутворення готових виробів.

Такі роботи можна умовно класифікувати за кількома ознаками, що відображають сутність заходів із забезпечення ефективності обробки:

- створення прогресивних конструкцій різального інструменту;
- застосування сучасних інструментальних матеріалів, кераміки та надтвердих матеріалів;
- зміна стану зони обробки, застосування активізаторів процесу різання/мікрорізання;
- заходи із «конструювання» виробу та використовуюваного матеріалу із врахування подальшої механічної обробки;
- розробка і впровадження гібридних процесів, спроможних змінювати умови і види керованого впливу на оброблювані композиційні заготовки.

При цьому головною умовою використання розробок є забезпечення мінімальності дефектного шару на створюваних поверхнях, передупання елімінації або іншого глибинного пошкодження матеріалу виробу за адгезійним або когезійним механізмами.

Якщо перші напрямки удосконалення процесів оброблення композитів є відомими і достатньо поширеними (вони базуються на фундаментальних працях науковців Харківської та Київської шкіл різання, зокрема, М.Ф. Семка, Г.В. Шабалина, П.С. Редька, Е.М. Левенберга, А.И. Грабченка, В.Л. Доброскока, В.А. Федоровича, Б.А. Перепелиці та ін.), то останні три напрями нині тільки починають активно розроблятися.

Так, в ряді робіт (дослідників В.М. Орла, О.О. Ченчевої, Є.Є. Лашка) показано, що зміна умов навантаження зони різання, зміна напруженого стану в місцях контакту із різальним або абразивним інструментом) може суттєво зменшити опір руйнуванню матеріалу.

Значні перспективи у контурній обробці матеріалів має і метод обробки потужним рідинним струменем. Гідроабразивне різання із компенсацією динамічних явищ (С.В. Коваленко) та попередньою ідентифікацією гідрорізної системи (О.В. Фомовська) дозволяє отримувати якісних різ матеріалів як карбон-полімерної так і карбон-карбонної груп.

Важливою проблемою при обробці композитів, особливо карбон-карбонної групи, є виділення тепла. Причиною є висока відновлюваність навантаженого та поверхнево-деформованого шару, внаслідок чого в місці контакту інструменту з матеріалом виділяється теплота  $q = f p v$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $p$  – контактний тиск;  $v$  – швидкість ковзання.

Утворене одномірне температурне поле отримують на основі рішення диференціального рівняння

$$q = q_0 A = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}(0, t), \quad T(x, t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right),$$

і для півбескінечного простору визначається так:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_0\sqrt{\alpha_T}}{\lambda_T} \left[ \sqrt{t} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right) - \sqrt{t-\tau} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T(t-\tau)}}\right) \right].$$

Саме тому в роботі О.О. Ченчевої пропонується обробку композитів виконувати виключно в умовах циклічно-періодичного навантаження, коли не тільки змінюється напруження у зоні контакту, а і

забезпечується активне відведення продуктів руйнування. Такі умови можна забезпечувати як шляхом спрямованої дії на інструмент, так і підведенням додаткової енергії у зону механічного впливу.

В.М. Орел пропонує створювати додаткове навантаження в зоні різання, на яку впливає різальний інструмент (тепер – водо абразивний струмінь), яке викликатиме появу розтяжних напружень у площині, перпендикулярній до осі дії різальної сили.

Утворені напруження, що одночасно залежать від струминного навантаження мікроділянок поверхні у зоні різання та від рівня попереднього навантаження зони різання, наприклад, від прикладення відповідних зусиль  $P$  до торця оброблюваної листової заготовки розмірами  $b \times l \times h$ , за умови початкової відсутності тріщин, у функції часу становитимуть

$$\bar{\sigma}(t) = \sqrt{\left(\frac{R_c \cos \alpha}{f_k}\right)^2 + \left(\frac{P \sin \omega t}{(b-l)h}\right)^2},$$

$$\text{що викликатиме випереджаюче зростання мікротріщин від величини } a_0 \text{ до } h_d = v \frac{a_0}{\sqrt[1-\frac{CQ_m d_c}{\xi(N)ms_k k}]{n/2-1}},$$

де  $N$  – кількість циклів навантаження;

$$C = a_0^{n/2-1} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^n \left(\frac{\rho}{\bar{c}}\right)^n, \quad K = \frac{1}{\sqrt{\pi(n/2-1)}},$$

$v$  – коефіцієнт Пуассону;  $a_0$  – початкове пошкодження поверхні;  $\rho$  – густина матеріалу;  $n, \bar{c}$  – константи матеріалу;  $s_k$  – швидкість контурної подачі;  $Q_m$  – витрата абразиву;  $m$  – середня маса однієї абразивної частинки,  $d_c$  – діаметр струменя,  $\sigma$  – створювані в зоні різання напруження.

Дослідженнями встановлено, що зменшення опору руйнування гідроабразивному різанню відбуватиметься як внаслідок зниження міцності матеріалу  $T, T = k\sigma_m$ , що відповідає рівнянню

$$Q = 0,106 \cdot \left(\frac{p}{100}\right)^{2,4} \cdot d_c^{-0,27} \cdot h^{-0,35} \cdot \left(\frac{T'}{100}\right)^{-0,75},$$

де  $p$  – тиск витікання, МПа;  $d_c$  – діаметр струминної насадки, мм;  $h$  – товщина оброблюваного матеріалу, мм;  $T'$  – міцність матеріалу,  $T' = k(\sigma_p - \sigma_a)$ , так і за рахунок явищ тріщиноутворення, за якого

$$l(t) = l_{\max} + \frac{K \left[2 + \alpha \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)\right]}{\Delta \sigma_d^2 \sqrt{\pi}} dN,$$

причому  $dN$  є функцією часу і визначається частотою коливань навантаження.

Зміна частоти прикладання навантаження  $N$  в діапазоні 5–50 Гц показала наступне. Зі зростанням частоти прикладання навантаження усереднена швидкість зростання тріщин за кожен наступний цикл різко сповільнюється, з одночасним зростанням сітки тріщин. В цьому випадку тріщини біфуркують, поширюючись у різні напрями відносно лінії дії силового навантаження. Аналіз впливу форми коливань довів, що суттєву відмінність від усереднених результатів виміру росту тріщин має лише випадок прикладання пилкоподібних навантажень, від дії яких тріщини зростають на 20–25% у порівнянні із квазігармонійним навантаженням. Усі інші види навантажень істотних відмінностей не мають (рис. 1).

Проілюстроване вище доводить, що кілька розрізних впливів може мати і синергетичний вплив на процес різання.

Якщо взяти до уваги, що формування властивостей виробу здійснюється шляхом виконання ряду технологічних переходів, при яких відбувається повна або часткова зміна початкових властивостей виробу (заготовки). Технологічні перетворення заготовки у виріб здійснюються цілеспрямованою сукупністю технологічних впливів  $W_{ij}(t_k)$  матеріального  $S_o(t_k), S_o(t_k) \in R_{nj} \cap M_{nj}$ , енергетичного  $E_o(t_k)$  та інформаційного  $I_o(t_k)$  типів, що дає змогу уявити схему формування вихідних властивостей відповідно до рис. 2 і записати:  $W_{ij}(t_k) = S_o(t_k) \cup E_o(t_k) \cup I_o(t_k)$ .

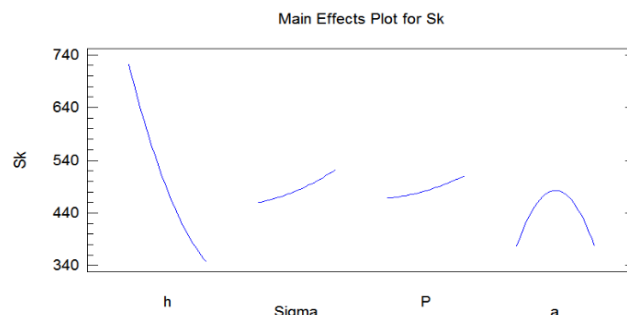


Рис. 1. Головні ефекти та поверхні відгуку для параметру швидкості контурної подачі у функції товщини, амплітуди та частоти коливань

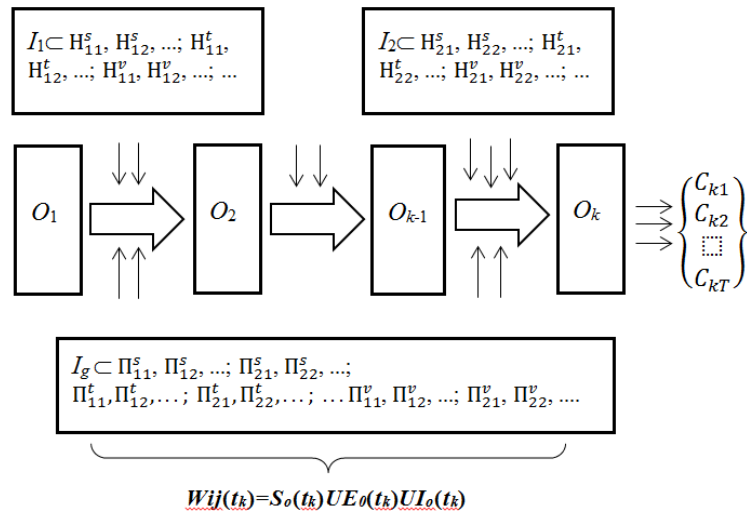


Рис. 2. Приклад формування властивостей виробу диференційованим або інтегрованим способами

Прийемо до уваги, що технологічні впливи інструменту на виріб мають здійснюватися на кількох рівнях одночасно, то реалізації технологічних впливів відобразиться матрицею виду:

$$A_3^T = \begin{pmatrix} \Pi_{11}^s & \Pi_{12}^s \dots & \Pi_{21}^s & \Pi_{22}^s \dots & H_{11}^s & H_{12}^s \dots & H_{21}^s & H_{22}^s \dots & E_{11}^s & E_{12}^s \dots & E_{21}^s & E_{22}^s \dots \\ \Pi_{11}^t & \Pi_{12}^t \dots & \Pi_{21}^t & \Pi_{22}^t \dots & H_{11}^t & H_{12}^t \dots & H_{21}^t & H_{22}^t \dots & E_{11}^t & E_{12}^t \dots & E_{21}^t & E_{22}^t \dots \\ \Pi_{11}^v & \Pi_{12}^v \dots & \Pi_{21}^v & \Pi_{22}^v \dots & H_{11}^v & H_{12}^v \dots & H_{21}^v & H_{22}^v \dots & E_{11}^v & E_{12}^v \dots & E_{21}^v & E_{22}^v \dots \end{pmatrix}$$

де  $\Pi_{11}^s, \Pi_{12}^s, \dots, \Pi_{21}^s, \Pi_{22}^s, \dots, \Pi_{11}^t, \Pi_{12}^t, \dots, \Pi_{21}^t, \Pi_{22}^t, \dots, \Pi_{11}^v, \Pi_{12}^v, \dots, \Pi_{21}^v, \Pi_{22}^v, \dots$  – варіанти переривних технологічних впливів за відповідними осями  $s, t$  та  $v$  системи координат  $s, t, v$ ;  $H_{11}^s, H_{12}^s, \dots, H_{21}^s, H_{22}^s, \dots, H_{11}^t, H_{12}^t, \dots, H_{21}^t, H_{22}^t, \dots, H_{11}^v, H_{12}^v, \dots, H_{21}^v, H_{22}^v, \dots$  – різні варіанти безперервних технологічних впливів за відповідними осями  $s, t$  та  $v$  системи координат  $s, t$  та  $v$ ;  $E_{11}^s, E_{12}^s, \dots$  – варіанти разових технологічних впливів.

Тож маємо альтернативи виконання технологічних впливів у вигляді інтегрованої дії (обробка гібридним інструментом) або, навпаки, диференційованої (один ФЕ формується кількома діями) (рис. 2).



Рис. 3. Фото отриманих зразків для механічних випробувань

У випадку, якщо ФЕ виробу  $E_m$  отримується при реалізації переривчастих технологічних впливів  $\Pi_{ij}^t$  і  $\Pi_{ij+k}^t$  із одночасним використанням  $k$  інструментів, то застосування одного (гібридного) інструменту відповідатиме  $R_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} R_{si}$  де  $R_{nj}$  – поле утворених нових видів інструментів;  $R_{si}$  –  $i$ -я сукупність відомих технічних рішень;  $\rho_i$  – вагомість підмножини відомих рішень. І навпаки, формування ФЕ кількома технологічними впливами відповідає умові  $M_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} M_{si}$ , де  $M_{nj}$  – поле утворених нових видів технологічних впливів.

На основі вище викладеного розглянемо виготовлення дослідного зразка розмірами  $b \times l \times h$  з кубічної заготовки розмірами  $B \times L \times H$ , причому зразок має криволінійні ділянки з радіусами  $r_i$ .

Позначимо:  $R_1$  – фрезерування;  $R_2$  – обробку абразивним кругом;  $R_3$  – обробку засобами зворотно-поступального руху (реноватор);  $R_4$  – свердлування;  $R_5$  – гідроабразивне різання. Можливі такі технологічні

операції:  $(R_2)-(R_1)$ ;  $(R_2)-(R_5)$ ;  $(R_2)-(R_4)-(R_5)$ . При оптимізації процесу за критерієм мінімізації часу обробки для заданого рівня якості отриманий варіант  $(R_2)-(R_4)-(R_5)$ , результат якого поданий на рис. 3. Така послідовність операцій дозволяє максимально повно використовувати всі переваги гідроабразивного різання (значне скорочення часу обробки) і уникнути деструкції матеріалу в момент пробою струменем.

У разі необхідності виконання профільного отвору або внутрішнього контуру для заготовок значної товщини застосовують попереднє свердлування; у протилежному випадку необхідності отримувати отвір немає, а різання розпочинають із вільного торця.

Сполучення різних за природою впливів веде як до істотного підвищення продуктивності процесу, так і до отримання принципово нових ефектів, обумовлених дією такого гібридного впливу. І яскравим прикладом такого сполучення є використання лазерно-струминного способу різання композитів (рис. 4).

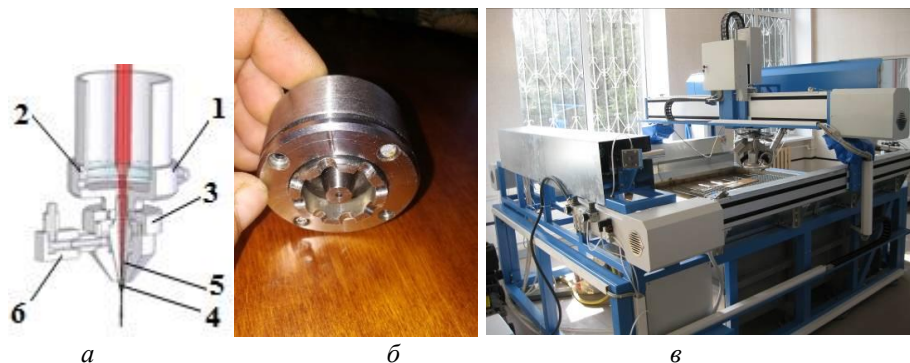


Рис. 4. Струминно-лазерна головка (а), її загальний вигляд (б) та комплекс ЛСК-400-5 для реалізації гібридної обробки (в)

В результаті статистичного опрацювання даних визначено ступінь впливу технологічних режимів на глибину борозенки різа, отриманого у зразках досліджуваних матеріалів. відповідні регресійні рівняння зведені до табл. 1–4. Узагальнення отриманих даних дозволяє зробити ряд суттєвих висновків.

Отримання контрольних різів показало, що результати моделювання із використанням розробленою авторами узагальненої моделі розвитку ерозії в анізотропному середовищі при струминно-променевому впливі в цілому задовільно узгоджуються із експериментами.

Таблиця 1 – Залежність глибини борозенки різа  $h$  від тиску технологічної рідини  $p$ , (МПа)

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
Композит типу ТК	5–10	$h = -0,12 + 0,044p - 0,00012p^2$	0,85
Сталь 40Х		$h = -0,85 + 0,055p - 0,00016p^2$	0,96
СВН		$h = -0,09 + 0,013p - 0,000486p^2$	0,92
Карбон С49	2–15	$h = -1,08 + 0,055p - 0,00013p^2$	0,94
СВА		$h = -0,12 + 0,044p - 0,00016p^2$	0,88

Примітка. Тиск вимірювали із точністю 10%

Таблиця 2 – Залежність глибини борозенки різа  $h$  від частоти імпульсів лазера  $f$  (Гц)

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
Композит ТК	5–10	$h = 1,36 + 0,0037f - 0,000008f^2$	0,92
Сталь 40Х		$h = 2,12 + 0,0137f - 0,000092f^2$	0,95
СВН		$h = 0,15 + 0,0010f - 0,000073f^2$	0,89
Карбон С49	2–15	$h = 0,54 + 0,0093f - 0,000032f^2$	0,97
СВА	1–15	$h = 0,62 + 0,0064f - 0,000017f^2$	0,93

Примітка. Частоту змінювали ступінчасто

Таблиця 3 – Залежність глибини борозенки різа  $h$  від тривалості імпульсів лазера  $\tau$  (мс)

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
Композит типу ТК	5–10	$h = 0,44 + 0,026\tau - 0,0000065\tau^2$	0,96
Сталь 40Х		$h = -0,121771 + 0,023\tau - 0,00005\tau^2$	0,89
СВН		$h = -0,002 + 0,0017\tau - 0,0000031\tau^2$	0,93
Карбон С49	2–15	$h = 0,074 + 0,022\tau - 0,000056\tau^2$	0,94
СВА	1–15	$h = -0,122 + 0,044\tau - 0,00013\tau^2$	0,97

Примітка. Тривалість встановлювали за можливостями генератора накачування

Таблиця 4 – Залежність глибини борозенки різа  $h$  від швидкості робочої подачі  $s$ , мм/с

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
----------	---------	---------------------	--------------

Композит типу ТК	5–10	$h_1 = \frac{1}{1,39 + 0,0080 s}$	0,88
Сталь 40Х		$h_1 = \frac{1}{0,32 + 0,0045 s}$	0,91
CBN		$h_1 = \frac{1}{2,34 + 0,0410 s}$	0,92
Карбон С49	2–15	$h_1 = \frac{1}{0,79 + 0,0049 s}$	0,89
СВА	1–15	$h_1 = \frac{1}{0,844 + 0,0056 s}$	0,92

Примітка. Швидкість задавали системою ЧПК

Максимальна відмінність очікуваної глибини різки (при порівнянні з реальною деструкцією матеріалу) спостерігається для матеріалів із армуванням скляними волокнами, що можна пояснити ефектом вторинного термічного руйнування матриці за рахунок світлопровідних властивостей наповнювача. Ефект проявляється сильніше при зменшенні швидкості руху робочої подачі.

Аналіз картин мікроруйнування показав (рис. 5, 6), що тривалістю дії струминно-променевого потоку можна регулювати глибину пропалювання і утворення умовного вирви, який не зважаючи на наближення його форми до циліндроїду, не є абсолютно симетричним. Регулюючи тривалість імпульсу лазера та швидкість переміщення по поверхні можна формувати ступінчасту структуру поверхні із забезпеченням розмірів «пікселю» на рівні 0,1 мм (при окремих реалізаціях дослідів вдалося досягти розміру 0,05 мм).

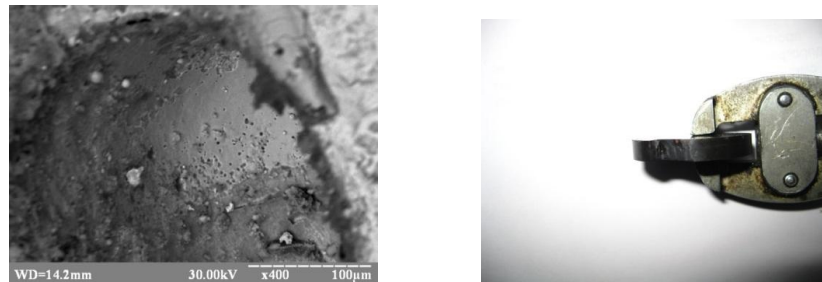


Рис. 5. Мікроруйнування та ванна розплаву матеріалу CBN

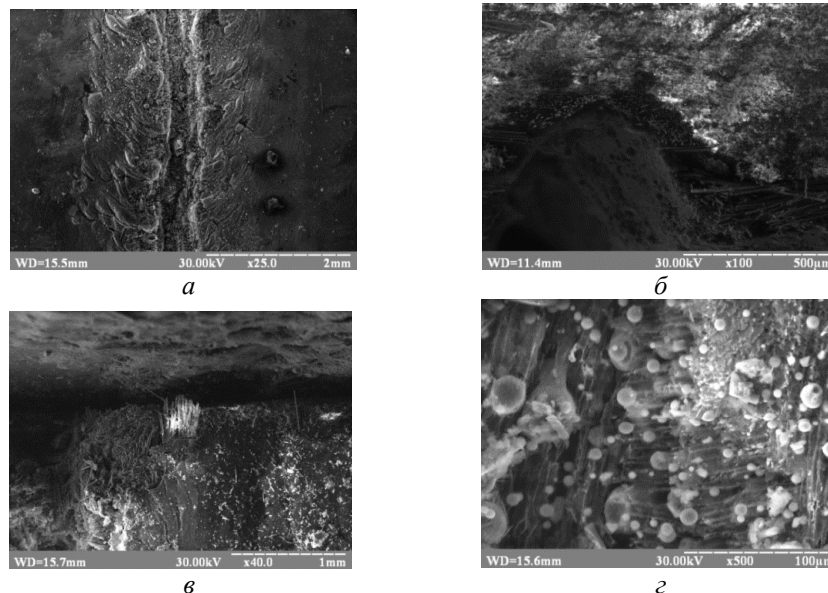


Рис. 6. Мікрофотографії різів волокнистих композитів: на фото (б) спостерігається висока якість борозенки, яка відсутня на фото (в); на останньому спостерігається корпускуляція волокон

Аналіз мікрофотографій лазерно-струминного різання волокнистих композитів доводить, що використання рідини дозволяє передувати виникненню водо насиченого шару, забезпечує задовільну якість крайки та низький рівень шорсткості.

Проведені дослідження також показали, що плазма, яка виникає у зоні струминно-променевого впливу, є головним чинником руйнування матеріал. Зменшення тривалості імпульсу менш ніж до 20 мс при генерації випромінювання призводить до припинення руйнування матеріалу. Отже, доцільно встановлювати частоту подання імпульсів 100 Гц при тривалості 50 мс.

Отже гібридизація обробних процесів є дієвим високоефективним способом поліпшення якості обробки та системно може залучатися до системи створення виробів із композитів.