

УДК 621.12.250

## ПОШИРЕННЯ ПРИНЦИПІВ ОПИСУ КОМПОНУВАЛЬНИХ СТРУКТУР НА ГІДРОРІЗНЕ ОБЛАДНАННЯ

*Саленко О.Ф., д.т.н., проф., Доценко В.Г., к.т.н., доц., Федотьев А.М., к.т.н., доц., Белкін О.М., ст. викл., Мана О.М., асп., Дудюк В.О., асп., Сербін В.О., студент Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20 E-mail: [salenko2006@ukr.net](mailto:salenko2006@ukr.net)*

Рассматриваются вопросы описания структур обрабатывающего оборудования, в частности, гидрорезных станков. Проведенный анализ позволил сформулировать основные принципы составления структурных формул, а также методику их анализа, использование которой позволило выявить перспективные модели оборудования и сформулировать требования к существующим образцам с целью расширения их технологических возможностей и повышения качества обработки.

**Ключевые слова:** гидрорезное оборудование, компоновки, модели

In article are considered questions of the description of the structures processing equipment, in particular, water jet tool. The Organized analysis has allowed formulate the cardinal principles of the writing structured molded, as well as methods of their analysis. Use given methods have allowed reveal the perspective models of the equipment and formulate the requirements to existing models for the reason expansions their technological possibilities and increasing quality processing.

**Key words:** water jet penetrations, description of the structures, types and models

**Вступ.** Сучасний ринок моделей гідрорізного обладнання бурхливо розвивається, що обумовлено значним зростанням попиту на обладнання нетермічного розкрювання заготовок. Наразі на світовому ринку присутні більше 30 потужних виробників обладнання, які сукупно реалізують понад 42 тис. одиниць обладнання на рік. Зазвичай це координатні розкрійні столи, в яких заготовка розташована горизонтально, а струминна головка здійснює переміщення за двома, рідше – трьома координатами. Обладнання коштує від 27 тис. до 190 тис. євро і відрізняється розмірами робочої зони, сервісним пакетом, використовуваними додатковими опціями. Однак жодна з моделей не має систем адаптивного керування, що значно б підвищило продуктивність обробки та знизило питомі енерговитрати.

Зважаючи на бурхливий розвиток ринку, цілком ймовірно припустити, що даний вид обладнання буде еволюціонувати з розширенням технологічних можливостей, підвищенням точності різання, зниженням недоліків процесу різання потужним струминним потоком над малого діаметру. У той же час головним вектором розвитку, подібно до машин механічної обробки, є пошук бажаних властивостей обладнання на основі нових компоновальних рішень. Роботи у цьому напрямку слід вважати актуальними.

**Мета роботи.** Виявлення нових конструктивних рішень, спрямованих на підвищення ефективності струминного різання за рахунок створення автоматичних і адаптивних гідрорізальних систем.

**Матеріал результати досліджень.** На нашу думку, пошук нових компоновальних рішень доці-

льно здійснювати на основі аналізу структур компоновань гідрорізних верстатів. З цією метою проаналізуємо принципи та підходи до опису систем металорізальних верстатів та обладнання для фізико-технічної обробки, оцінимо можливості поширення цих принципів на гідрорізне обладнання.

Для аналізу варіантів компоновань металорізальних верстатів та пошуку раціональних рішень використовують структурні формули – визначну послідовність символів, що позначає рухомі та нерухомі блоки, за якими можна відслідкувати зв'язок окремих блоків між собою.

Відомо [1], що будь-який верстат складається з основи (нерухомого блоку) та ряду переміщувальних вузлів (рухомих блоків), які, рухаючись за певними координатними осями, дозволяють виконувати формоутворення поверхонь напрямними та твірними лініями. Відповідно до стандарту ISO вісь координат завжди приймають паралельно вісі головного шпинделя, незалежно від того, як він розташований. За позитивний напрямок вісі  $Z$  приймається напрямок від заготовки до інструменту (рис. 1), а вісь  $X$  приймають завжди горизонтальною. Додаткові рухи, паралельні вісям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  позначають відповідно  $U$ ,  $V$ ,  $W$  (вторинні) та  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  (третинні). Оберткові довкола вісей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  рухи позначають як  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , а додаткові –  $D$ ,  $E$ .

Позитивний напрямок для  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – за рухом правого гвинта. Головний шпиндель позначають буквою  $S$ , головний рух – знаком  $\dot{S}$ . Запис блоків ведуть від заготовки до інструменту (зліва напра-

во). Індеси  $V$  та  $h$  позначають горизонтальну або вертикальну вісь.

Блоки можуть бути з'єднані як послідовно (при цьому використовуються символ “.”), так і паралельно (символ “+”). Додаткові пристрої, що розвивають конструктивний ланцюг, позначають на відповідному кінці формули у квадратних дужках. Найбільш близьким за сутністю є лазерне різання. Лазерна обробка базується на взаємодії лазерного пучка з поверхнею оброблюваного матеріалу при їх відносному переміщенні. Траєкторія цього переміщення залежить від геометрії оброблюваної поверхні.

Сукупність відносних рухів лазерного пучка й оброблюваної заготовки, необхідних для утворення заданої поверхні деталі, додаткові рухи та зв'язки між ними визначають кінематичну структуру обро-

блюваної машини, що є основою її компоновання.

Як і у випадку металорізальних верстатів, лазерне обладнання має блокову структуру і складається з одного стаціонарного і кількох рухомих блоків, що з'єднані між собою послідовно або паралельно за допомогою напрямних - лінійних і кругових.

Рухомі блоки можуть виконувати передбачені кінематичною структурою координатні переміщення. Пристрій, що фокусує лазерний пучок, і блок, що несе заготовку, в компонованні завжди є крайніми блоками. Послідовне з'єднання рухомих блоків застосовується для створення відносного руху лазерного пучка і заготовки по складних просторових траєкторіях. Автори роботи пропонують для опису компоновань використовувати структурні формули, складені за таких принципів.

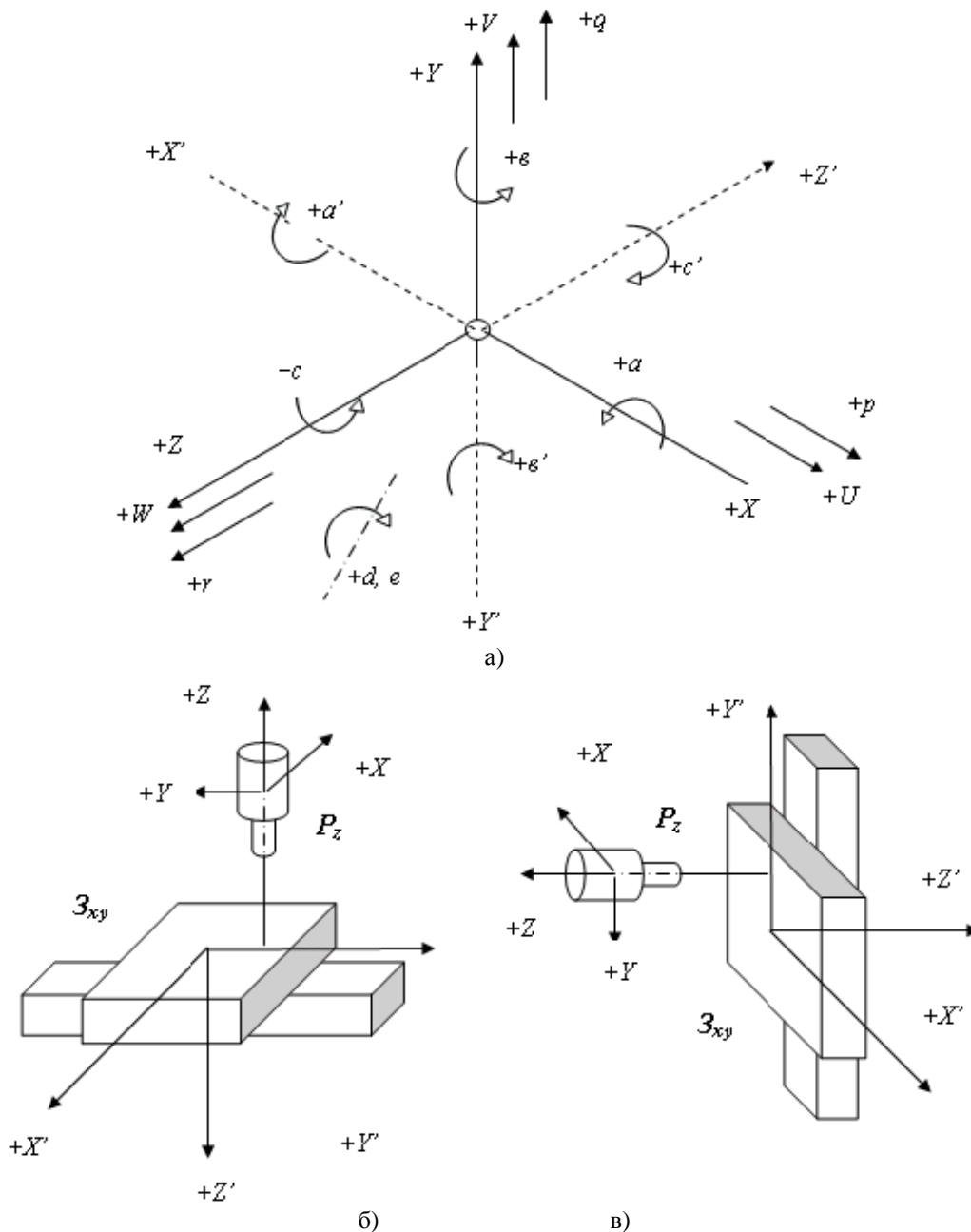


Рисунок 1 – Головні вісі та система координат матеріалообробного обладнання  
Вісь  $Z$  сполучена з віссю сфокусованого лазерного пучка, її позитивний напрямок – від заготовки до

об'єктиву. Вісь  $X$  завжди горизонтальна. Положення вісі  $Y$  визначається розташуванням двох інших вісей. Оберткові рухи навколо вісей  $X, Y, Z$  позначають буквами  $A, B, C$ . Рухомим блокам присвоюють ті ж знаки, що і виконуваним ними координатним рухам (формотворні — прописними буквами, допоміжні — рядковими). Стационарний блок має знак  $O$ , чим підкреслюється відсутність руху. Блок фокусування лазерного пучка позначають буквою  $F$  при знаку блоку:  $X_F, Y_F, Z_F$ . Випромінювач лазера може бути з'єднаний як зі стационарним, так і з рухомим блоками. Це з'єднання позначають буквою  $L$  біля знаку блоку:  $O_L, X_L, Y_L, Z_L$ . Якщо фокусуючий пристрій і випромінювач з'єднані разом зі стационарним чи рухомим блоком, то в структурній формулі букви  $F$  і  $L$  записують поруч знаку блоку, на якому вони встановлені:  $O_{LF}, X_{LF}, Y_{LF}$ .

Горизонтальне  $h$  чи вертикальне  $v$  положення вісі сфокусованого лазерного пучка при букві  $z$  означає, що має місце додатковий рух об'єктиву при фокусуванні випромінювання вздовж вісі  $Z$ .

У структурних формулах позначення записуються в порядку розташування блоків. Блок, що несе заготовку, у формулі записується крайнім ліворуч, а блок фокусування випромінювання — крайнім праворуч. Стационарний блок  $O$  поділяє рухи, що здійснюються заготовкою і фокусуючим пристроєм. Від положення стационарного блоку в компонованні залежить розподіл елементарних рухів між заготовкою і фокусуючим пристроєм.

Будь-яке складне відносне переміщення заготівлі і лазерного пучка можна здійснити шляхом поступального переміщення вздовж трьох вісей  $X, Y, Z$  і обертальних рухів навколо них. Для цього необхідно мати компоновання, що складається із шести рухомих і одного стационарного блоку.

Такому компонованню відповідає структурна формула, що складається із семи складових.

Загальна кількість структурних варіантів горизонтальних і вертикальних компоновань з урахуванням рухомості блоку фокусуючого пристрою відносно випромінювача, з'єданого зі стационарним блоком, складає [2]:

$$p_n = 2\{n! + [n! - (n-1)!]\}$$

де  $n$  — кількість послідовних з'єднаних блоків компоновання.

Далі автори зазначають, що лазерна обробка здійснюється при відносному русі лазерного пучка і заготовки в робочому полі, що утвориться в результаті взаємодії поля лазерного пучка і поля заготовки. Під полем лазерного пучка і полем заготовки автори зазначають область простору, яку займає лазерний пучок та заготовка при координатних переміщеннях.

Матриці форм полів заготовки і лазерного пучка для двокоординатних компоновань лазерних технологічних установок з поступальним рухом блоків подано на рис. 2. Мінімальне поле лазерного пучка дорівнює розміру перетину пучка в зоні обробки. Воно характерно для компоновань, рухомі блоки

яких знаходяться в ланцюгу заготовки. Залежно від рухомості блоків ланцюгу лазерного пучка поле його трансформується в лінію чи площину, розміри яких не перевищують розмірів заготовки.

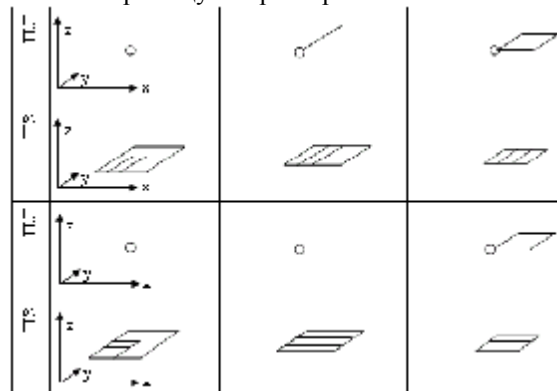


Рисунок 2 – Матриця форм полів заготовки ПЗ та лазерного променя (ПЛП) для випадку вертикального розташування осі променя

Мінімальне поле заготовки визначається її розмірами. Таке поле характерно для компоновань, в яких рухомі блоки знаходяться в ланцюгу лазерного пучка. При збільшенні рухомості заготовки розміри поля заготовки збільшуються. Найбільше поле заготовки характерно для компоновань, у яких усі рухомі блоки знаходяться в ланцюгу заготовки.

У робочому полі компоновання лазерної технологічної установки виявляються похибки обробки заготовок, що залежать від зміни зовнішніх умов і внутрішнього стану системи. Точність компоновання лазерної установки залежить від зміни координат робочого поля. Це пов'язано зі зміною як жорсткості компоновання, так і розмірів перетину лазерного пучка при його переміщенні в робочому полі компоновання.

Гідроструминне різання подібне до різання за допомогою лазерного променя (рис. 3): заготовка, переважно горизонтально, розташовується на робочому столі, швидкоплинний потік рідини (як і промінь лазера) впливає на окрему точку поверхні заготовки, внаслідок чого виникає одинична ерозійна лунка.

Гідрорізання також здійснюється без безпосереднього контакту механічної ланки робочого органу (РО) з оброблюваною заготовкою (З), а його ефективність забезпечується лише за умови підтримання оптимальної відстані між робочим органом і поверхнею оброблюваної заготовки (відповідно  $f_0$  та  $l_0$ ). Натомість енергія до зони деструкції матеріалу підводиться швидкоплинним потоком рідини, який, власне, і виконує роботу руйнування.

Таким чином, схожість цих двох методів керованого руйнування матеріалів полягає у такому: 1) відсутність безпосереднього механічного контакту ланки робочого органу із оброблюваною заготовкою; 2) прямолінійність надходження потоку енергії від джерела; 3) необхідність підтримання оптимальної відстані між робочим органом та оброблюваною поверхнею; 4) наближення плями впливу до теоре-

тичної точки.

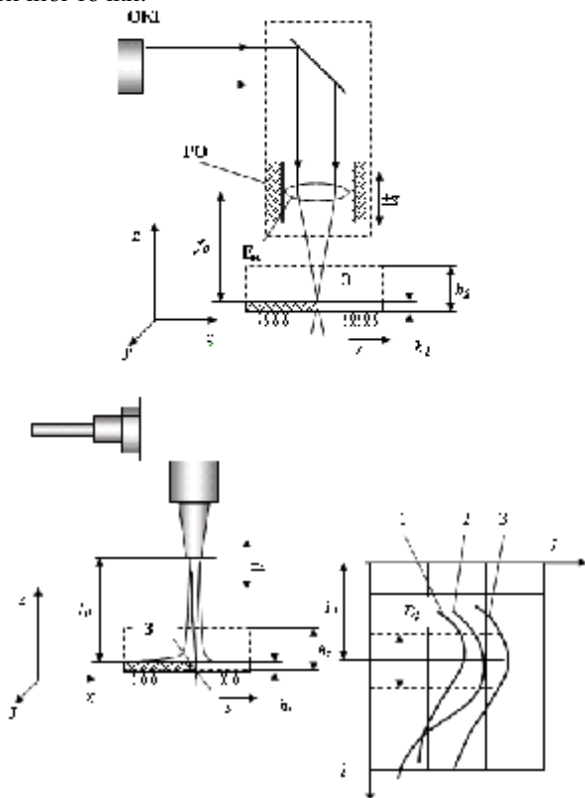


Рисунок 3 – Тотожність схем теологічного налагодження лазерного (а) та гідроструминного (б) різання листових матеріалів

З точки зору компоновки гідрорізного обладнання значення має 1-ша та 3-тя ознаки, отже, переміщення елемента  $E_{13}$ , що забезпечує оптимальну відстань до оброблюваної поверхні ( $f_0$  для лазерної обробки,  $l_0$  – для гідрорізання), повинно враховуватися структурною формулою і для гідрорізних верстатів.

Отже, можна сформулювати такі принципи опису компоувальних структур гідрорізного обладнання: 1) опис компоувальних структур гідрорізних верстатів, як і взагалі металорізальних верстатів, здійснюється для розташування вісей координат відповідно до вимог ISO;

2) внаслідок того, що гідрорізанням піддають, в основному, плоскі довгі заготовки, вісь Z розташовують завжди вертикально, а позитивний напрямок відкладуть від заготовки до струминної головки; 3) структурна формула пов'яже між собою ланки заготовки та струминної головки, а запис ведеться від заготовки, позначеної  $Z_{ij}$  з індексами, що вказують на площину її розташування на робочому столі, до струминної головки P з індексом, що вказує на напрямок переміщення для підтримання оптимальної відстані (він співпадає з віссю витікання струменя); 4) прописними літерами позначають головні рухи формоутворення, рядковими – рухи інтенсифікуючі (зворотно-поступальні з невеликими амплітудами (рис. 3); 5) зв'язок заготовки Z із робочим органом P (струменем рідини) здійснюється через базовий елемент – основу O; 6) з урахуванням особливостей

контролю процесу різання ланка контролюючого пристрою вводиться як додатковий рухомий блок, встановлений на одному із блоків верстата із відповідним записом до структурної формули у дужках.

Виходячи з наведеного, структурна формула компоування гідрорізального верстата запишеться з таких міркувань. Головна вісь, яка за класифікацією ISO є віссю шпинделя, співпадатиме з віссю струменя рідини надвисокого тиску. Рух потоку рідини, який здійснює роботу руйнування, позначимо через P. Оброблювану заготовку позначатимемо як Z через площину, в якій вона розташована. Тоді, відповідно до рис. 1, а, для типового компоування гідрорізного верстата структурна формула набуде

вигляду  $Z_{xy} OXYzPz$ , тобто нерухома заготовка знаходиться на робочому столі (рис. 1, б), що має координати руху X та Y, на елементі, що рухається у напрямку  $\pm Y$  є додатковий привод z, на якому змонтовано струминну головку, встановлену вертикально (уздовж вісі z). З огляду на те, що гідрорізання використовується переважно для операцій з листовими матеріалами, компоування рис. 1, в сенсу не матиме: встановлення заготовки у вертикальній площині є складним та недоцільним.

У той же час доцільним може бути встановлення заготовки під певним кутом до горизонтальної поверхні: це дає змогу частково зменшити поле заготовки (рис. 2) за рахунок скорочення площі з  $lxb$  до  $l(x \cos \alpha)b$ ,  $\alpha$  – кут нахилу, а також забезпечити безперешкодне стікання рідини з оброблюваної поверхні.

Можна записати структурні формули компоувальних типоряду верстатів відомих виробників (табл. 1).

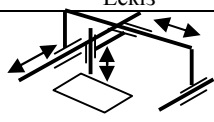
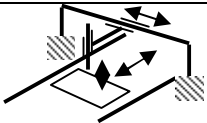
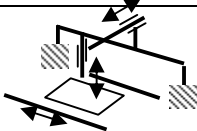
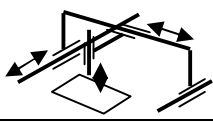
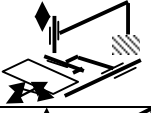
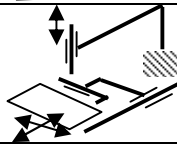
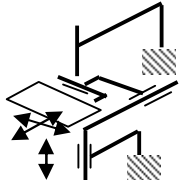
Розширення технологічних можливостей гідрорізних верстатів криється в пошуку нових компоувальних рішень, ефективних для виконання тих чи інших операцій розкrojовання. Складемо таблицю, в якій прослідкуємо можливі зміни компоувальних розкrojовальних верстатів при інверсуванні блоків, тобто при перенесенні рухомих блоків з одного ланцюга до іншого відносно основи (табл. 2).

Очевидно, що інверсія рухомих блоків, тобто надання певних координатних рухів блокам заготовки замість блоків струминної головки доводить, що варіанти 1-4 вже існують (другий та третій варіанти не набули широкого розповсюдження, четвертий варіант найбільш поширений у західних виробників – трьохосьове керування (X,Y,Z)). Заслужує на увагу варіант 9 (менш технологічним є варіант 8) –  $Z_{xy} XYOPzZ$ , який передбачає надання рухів подачі установлених в горизонтальній площині заготовці, у той час коли її товщину може компенсувати переміщення струминної головки по координаті Z. Варіанти 5-7 мають значно менші технологічні можливості порівняно з вар. 9, варіант 10 є складним у конструктивному виконанні внаслідок того, що вертикальне переміщення заготовки значних розмірів спряжено із рядом складнощів.

Таблиця 1 – Типоряд гідрорізних верстатів провідних виробників

№	Фірма-виробник та загальний вигляд верстата	Структурна формула
1	2	3
1	 <p>Фірма „Родень” (Україна)</p>	$3_{xy}OXYZP_z$
2	 <p>Фірма „Кнут” (Німеччина)</p>	$3_{xy}OXYZP_z$
	 <p>Фірма „Кнут” (Німеччина)</p>	$3_{xy}OXYP_z$
	 <p>Багатоголовкова система “Sweden WaterJet”</p>	$3_{xy}OXYZA(P_z)$
	 <p>Кутова поворотна головка</p>	$3_{xy}OXYZabP_z$

Таблиця 2 – Деякі компоновання, отримані на основі перестановок рухомих блоків

№	Формула	Опис	Ескіз	Примітка
1	$3_{xy}OXYP_z(z)$	Нерухома у площині XOY заготовка, рухома струминна головка, переміщення по z установче		Типове компоновання
2	$3_{xy}XOYP_z(z)$	Заготовка рухається уздовж X, струминна головка переміщується за Y, установче переміщення – z		Відоме компоновання $23_{xy}XO(y)P_z(z)$ – різання прямолінійних закрайок
3	$3_{xy}YOXP_z(z)$	Заготовка рухається уздовж Y, струминна головка переміщується за X, установче переміщення – z		Також відоме компоновання $3_{xy}YO(x)P_z(z)$ – мірне прямолінійне різання
4	$3_{xy}OXYZP_z$	Заготовка нерухома, розташована у площині XOY, струминна головка здійснює усі координатні переміщення		Різновиди: $23_{xy}YOXZP_z$ ; $43_{xy}YOXZP_z$
5	$3_{xy}XOYZP_z$	Відміна від 2, 3 – кероване переміщення по координаті Z	-----	
6	$3_{xy}YOXZP_z$			
7	$3_{xy}ZOXYP_z$	Заготовка переміщ. Вертикально	-----	Компоновання невідоме
8	$3_{xy}XYOP_z(z)$	Керовані переміщення здійснює заготовка, координата z – установча		
9	$3_{xy}XYOP_zZ$	Керовані переміщення здійснює заготовка, координата Z забезпечується струминною головкою		Найбільш цікаве компоновання, що відповідає компонованні листообробних пресів
10	$3_{xy}XYZOP_z$	Усі переміщення здійснює заготовка		Необхідна складна система вертикального переміщення заготовки

Подані варіанти компоновань не охоплюють усіх конструктивних особливостей гідрорізних верстатів (у першу чергу стосовно систем керування обробкою) і потребують уточнення. Таке уточнення доцільно виконати із використанням підходів морфологічного та функціонально-вартісного аналізу, а відбір кращого варіанту здійснити на основі одно- або багатокритеріального порівняння. Морфологічний аналіз також дозволяє виконати порівняння ефектів, що супроводжують струминне різання.

Гідрорізний верстат є складною технічною системою, в якій з метою здійснення керованої струминної ерозії забезпечене узгоджене функціонування окремих систем та пристроїв: блоку живлення високого тиску – головного приводу; струменеформуючої системи, пристроїв для переміщення головки або оброблюваної заготовки – приводів подач, елементів та пристроїв контролю процесу гідрорізання.

Складність та нестационарність процесів струминної ерозії, одночасна взаємодія великої кількості елементів, що мають певні матеріально-функціональні характеристики, фізико-механічні особливості оброблюваних матеріалів та відсутність системного підходу до створення конструкцій гідрорізних верстатів потребують проведення морфологічного аналізу, спрямованого на виявлення оптимальних компоновальних рішень, а також засобів та пристроїв ефективного керування струминною ерозією в реальних умовах при відповідних алгоритмах адаптивного керування. Саме на основі адаптивного керування з мінімальною кількістю функціональних блоків можливе досягнення високої ефективності струминного різання.

Структурну схему взаємодії окремих елементів гідрорізного верстата із системою контролю зони різання розглянуто в [3].

Інформація про поверхню, яку необхідно отримати, в кодованому вигляді подана в керуючій програмі. Система керування виконує послідовне її зчитування та за допомогою інтерполятора обчислює миттєве положення робочого органу. Далі опрацьовуються вихідні сигнали на приводи, які при сумісному відпрацюванні виконують контурну обробку. Додатково система керування контролює основні режими роботи джерела живлення високого тиску, системи регенерації відпрацьованої рідини та ін. Створені умови (динамічний тиск  $p_b$ , швидкість перенесення гідровпливу  $v_k$ , напружений стан зони передруйнування  $S_p$  на поверхні діаметром  $d_p$  та бічних поверхонь контуру різа  $S_b$ ) визначають розвиток струминної ерозії у локальних обсягах матеріалу, формують макрогеометрію борозенки різа, визначають показники якості утвореної поверхні поділу, у тому числі, товщину деструктивного шару.

Певний вплив на формування вихідних показників якості має і схема технологічного налагодження: відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні  $l_0$  (особливо при обробці різнотовщинних заготовок або заготовок просторової форми), умови закріплення заготовки на столі верстата.

Процес струминної ерозії мікрообсягів оброблюваної заготовки супроводжується рядом фізичних ефектів: 1) шумовою емісією (внаслідок схлопування кавітаційних порожнин, розвитку магістральних тріщин та гідрударних явищ при відділенні від тіла заготовки мікрочастинки; 2) дисипацією струменя при стіканні з перепони – оброблюваної поверхні; 3) зміною оптичної прозорості струменя (при порушенні його структурованості, дисипації у повітрі); 4) відхиленням струменя від початкового стану при обтіканні поверхні поділу на фронті гідроруйнування; 5) тепловими явищами у зоні струминної обробки, внаслідок яких температура рідини підвищується на 30-50<sup>0</sup>С.

Можна припустити, що прояв того чи іншого ефекту залежатиме від інтенсивності струминної ерозії, продуктивності процесу, а, в кінцевому рахунку, буде пов'язаний з отриманими вихідними показниками якості.

Отже, контролювання зазначених параметрів за допомогою датчиків та перетворювачів дозволяє отримати сигнал, подавання якого на систему керування дозволить вносити відповідний коригуючий вплив для досягнення максимальної продуктивності процесу та заданого рівня якості утворених поверхонь поділу. Для гідрорізальної системи маємо певну класифікацію чинників (табл. 3), причому головними параметрами, які необхідно контролювати для забезпечення оптимальних умов протікання нестационарного процесу струминної ерозії, є реальна міцність та структура оброблюваного матеріалу ( $h_1, S_1, h_2, S_2$  – для моделі двокомпонентного тришарового композита як ортотропного матеріалу).

Умови евакуації рідини обумовлюються наявністю або відсутністю її вільного стікання. Роботою [4] було показано, що ускладнене стікання відпрацьованого потоку призводить до значного погіршення якості обробки. Виходячи зі схеми розташування оброблюваної заготовки на столі гідрорізального вер-

тата, можна зробити висновок, що опора заготовки у вигляді вільно насипаних кульок або сіткових ножів періодично змінює умови стікання рідини при русі різального сопла по поверхні заготовки.

Для проведення аналізу компоновочних рішень та керованості процесу гідрорізання складено морфологічну таблицю основних елементів та підсистем верстата (ТОС гідрорізання (табл. 4)), виходячи з охоплення обробного середовища, оброблюваного середовища та їх взаємодії у робочому процесі.

Відповідно з поданої класифікації типові гідрорізальні системи можуть бути описані таким виразом:

$$X_{n-1} = \begin{matrix} 1.1 & 2.1 & 3.5 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.4 & 9.6 \\ | & | & & | & | & & | & | & | \\ 1.3 & 2.3 & & (4.2)* & 5.2 & & (7.2)* & & & \\ (1.5) & & & & & & & & & \end{matrix}$$

де \* - можливий варіант, який потребує уточнення.

Пропоновані комбінації можуть бути подані у такому вигляді:

$$C1: \begin{matrix} 1.1 & 2.1 & 3.5 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.4 & 9.6 \\ | & | & & | & | & & | & | & | \\ 1.3 & 2.3 & & (4.2)* & 5.2 & & (7.2)* & & & \end{matrix}$$

$$C2: \begin{matrix} 1.2 & 2.1 & 3.5 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.5 \\ | & | & & | & | & & | & | & | \\ 1.4 & 2.2 & & (4.2)* & 5.2 & & (7.2)* & 8.3 & & \\ & | & & & & & & & & \\ & 2.3 & & & & & & & & \end{matrix}$$

$$C3: \begin{matrix} 1.2 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.6 & 7.1 & 8.3 & 9.5 \\ | & | & & | & | & & | & | & | \\ 1.4 & 2.2 & & (4.2)* & 5.2 & & (7.2)* & & & \\ & | & & & & & & & & \\ & 2.3 & & & & & & & & \end{matrix}$$

$$C4: \begin{matrix} 1.2 & 2.1 & 3.4 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.3 & 9.5 \\ | & | & & | & | & & | & | & | \\ 1.4 & 2.2 & & (4.2)* & 5.2 & & (7.2)* & & & \\ & | & & & & & & & & \\ & 2.3 & & & & & & & & \end{matrix}$$

$$C5: \begin{matrix} 1.2 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.6 & 7.1 & 8.3 & 9.5 \\ | & | & | & | & | & & | & | & | \\ 1.4 & 2.2 & 3.4 & (4.2)* & 5.2 & & (7.2)* & & & \\ & | & & & & & & & & \\ & 2.3 & & & & & & & & \end{matrix}$$

$$C6: \begin{matrix} 1.2 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.5 & 7.1 & 8.3 & 9.5 \\ | & | & & | & | & & | & | & | \\ 1.4 & 2.2 & & (4.2)* & 5.2 & & (7.2)* & & & \\ & | & & & & & & & & \\ & 2.3 & & & & & & & & \end{matrix}$$

Отже, сполучення окремих ознак елементів гідрорізального обладнання дозволяє виявити наступні нові ефекти можливих конструктивних рішень: C1 - враховує структуру оброблюваного матеріалу за допомогою простого контрольного пристрою; C2 - дозволяє виконувати обробку матеріалів профільних або змінної товщини в оптимальних умовах (додатково введений до структури пристрій може бути незв'язаний безпосередньо із системою керування: наприклад, установлений на струминній головці слідкуючий механізм); C3 – заготовці надано рух контурної подачі, замість надання даного руху струминній головці; C4 – заготовка здійснює осцилюючий рух для інтенсифікації процесу струминного різання (високочастотна вібрація з амплітудою, що дорівнює половині діаметра струменя), рух контурної подачі виконує інструмент; C5 – осцилюючий рух контурної подачі здійснює заготовка; C6 – заготовка здійснює рух контурної подачі, а струминна головка – осцилюючий рух.

Таблиця 3 – Керованість та контрольованість чинників гідрообробки

№ п/п	Чинник	Позначення	Керованість/ контрольованість
1	Тиск рідини	$p_b$	Керов.
2	Пульсації тиску	$Dp_w, f_p$	Керов.
3	Швидкість подачі	$S_b, Ds$	Керов.
4	Міцність матеріалу	$T$	Ум.контр./не кер.
5	Структура матеріалу	$h_1, s_1, h_2, s_2$	Ум.контр./не кер.
6	Відстань від сопла до поверхні	$l_o$	Контрольов.
7	Умови евакуації рідини (розміщення на столі)	--	Контрольов.
8	Діаметр сопла	$d_c$	Контрольов.
9	Товщина матеріалу	$h_m$	Контрольов.
10	Напружений стан	$S_m, t_n$	Контрольов.

Пропоновані компонування обладнання відповідно до розглянутих варіантів матимуть такі структурні формули: С2:  $3_{xy}OXYZ\bar{P}_z$  - усі рухи, у тому числі і по координаті Z, здійснює струминна головка; С3:  $3_{xy}XYO(z)\bar{P}_z$  - заготовка здійснює рух подачі, координата z залишається установчою; С6:  $3_{xy}XYOP_z(xy)$  - заготовка здійснює рух подачі, головка виконує осцилюючі рухи для інтенсифікації процесу; С9:  $3_{xy}XYOZ\bar{P}_z(xy)$  - заготовка здійснює рух подачі, головка забезпечує подачу і по координаті Z, можливий осцилюючий рух головки.

Остання структурна формула доводить, що інтенсифікуючий осцилюючий рух струминної головки вимагає використання двох приводів або двох осциляторів із взаємопов'язаними рухами. Це дає змогу узгодити напрямки осциляції із рухом подачі, який у загальному випадку є контурним. Спростити компонування можна, якщо перетворити два пов'язані лінійні рухи у обертовий і лінійний:  $xy \rightarrow p_b c$ . Тепер лінійне переміщення може забезпечуватися віброприводом з лінійною координатою, а обертова координата забезпечуватиме співпадання напрямків контурної подачі та вібраційного руху. Вдосконалене компонування відобразиться записом (рис.4):

з урахуванням того, що наразі відсутні систематизовані відомості щодо пристроїв контролю процесу струминного різання [5], а проведений морфологічний аналіз показав певну множину ефектів, на базі яких можлива велика кількість конструктивних рішень відповідних систем моніторингу зони різання, введемо до структурної формули компоненти, які б дозволяли відображати місце елемента моніторингу в структурі верстата.

$$C9^*: 3_{xy}XYOZ\bar{P}_z(p_b c).$$

Для запису відповідних компонент формули введемо ряд базових положень: 1) вважаємо, що система моніторингу струминної обробки може монтуватися на базових, рухомих елементах або на струминній головці. Місце розташування пристрою відображається у формулі за записом відповідного блоку або елемента, а сам елемент позначається як M;

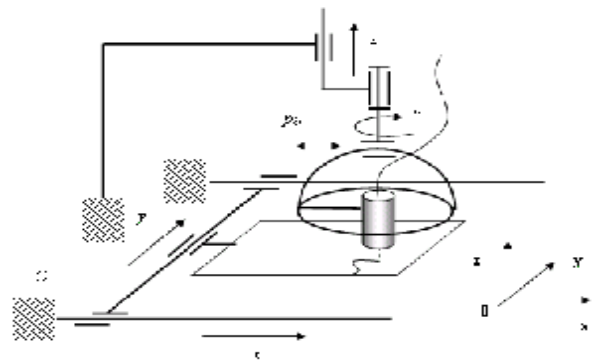


Рисунок 4 – Компонувальне рішення гідрорізного верстата за варіантом С9'

2) якщо пристрій складається із кількох пов'язаних між собою елементів, їх позначають відповідно як  $M^1, M^2 \dots$ , зазначаючи місце розташування кожного з елементів за вищеподаним правилом; якщо система моніторингу використовує кілька не пов'язаних систем моніторингу, позначатимемо їх як  $M_1, M_2 \dots$ ; 3) у дужках після позначення відповідного елемента моніторингу зазначається параметр, який контролює система.

Отже, для пропонованих варіантів конструктивних рішень систем моніторингу С12-С16 маємо наступні структурні формули:

С12:  $3_{xy}OXYZ\bar{P}_z M$  - варіант виконання системи моніторингу на основі контролювання шумового ефекту. Заготовка нерухома, переміщення здійснює інструмент. Чутливий елемент (датчик) встановлено на струминній головці, його переміщення здійснюється разом із рухами головки, контроль зони різання постійний.

С13:  $3_{xy}XYOM^1_z\bar{P}_z M^2$  - система моніторингу виконана на основі індукційного ефекту (контролювання відхилення струменя від напрямку натикання на перепону). Датчик складається з двох елементів, один змонтований на нерухомій частині верстата, інший – на струминній головці. Контурний рух подачі здійснює заготовка.

$$C14: 3_{xy}M^1OXYZ\bar{P}_z(p_b c)M^2;$$



C14' :  $3_{xy}XYM^1Oz\bar{P}_z(pbc)M^2$  - варіанти компоновки обладнання, в якому індукційний контроль стікання струменя виконується постійно, однак у першому випадку заготовка і один з елементів датчика залишається нерухомим, а переміщення здійснює струминна головка, а у другому випадку контурний рух подачі здійснює саме заготовка.

C15:  $3_{xy}XYOz\bar{P}_zM$  - варіант виконання оптичної системи, в якій датчик контролю встановлений на струминній головці, рух подачі здійснює заготовка; можливий варіант виконання пристрою відповідно до C12, тобто  $3_{xy}OXYz\bar{P}_zM$ , а C15~C12.

C16:  $3_{xy}XYOz\bar{P}_zM_1M_2$  - варіант виконання системи моніторингу з двома датчиками, наприклад, тактильним для підтримання оптимальної відстані між оброблюваною поверхнею та соплом та оптичним – для забезпечення оптимальних умов протікання нестационарних процесів струминної ерозії.

Аналіз структурних формул C12-C16 показав, що не всі отримані нами в процесі морфологічного аналізу варіанти конструктивного виконання гідрорізальних систем будуть здійснені. З урахуванням маємо, що компоновання C14 не має сенсу: переміщення струминної головки не створить умов для того, щоб здійснювати постійний контроль процесу за допомогою індуктивного датчика, один з елементів якого нерухомо змонтований на столі верстата. У той же час ідентифікація оброблюваного матеріалу шляхом виконання тестового різку (із виміром певних параметрів) найбільш доцільна саме для компоновання C13. Компоновання C12 та C15 є тотожними, отже, вибір варіанту обумовлюватиметься тільки достовірністю та простотою виміру контрольованого параметру в той чи інший спосіб. Окрім того, верстата такої структури є найбільш простими.

Таким чином, оптимальному за рядом технологічних ознак варіанту C9' відповідає варіант адаптивного верстата C14', однак варіант C16, який легко можна отримати із C14' є найбільш універсальним з точки зору технологічних можливостей обробки, однак і найбільш складним.

Таким чином, найбільш універсальним є обладнання, яке відповідає структурним формулам: C14'  $3_{xy}XYM^1Oz\bar{P}_z(pbc)M^2$ ; C15  $3_{xy}XYOz\bar{P}_zM$  (або  $3_{xy}OXYz\bar{P}_zM$ ); C16  $3_{xy}XYOz\bar{P}_zM_1M_2$ . Усі вони відповідають базовому компонованню C9.

Всі ці варіанти передбачають надання руху подачі заготовці. Однак найбільш простим є варіант системи моніторингу зони різання, побудованій на оптичному датчику.

Розглянемо забезпечення множини властивостей гідрорізного верстата із адаптивною системою керування матеріальними засобами та елементами конструкції.

Відомо [5], що сукупність властивостей матеріального об'єкту можна подати у вигляді певного ма-

сиву елементарних складових, серед яких є корисні, суміжні, безкорисні, шкідливі та інші властивості (функції).

Позначимо матрицю функцій як

$$W = \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ \Phi_6 \end{pmatrix},$$

де  $\Phi_i$  – елемент, який забезпечує певні властивості верстата:

$\Phi_1$  – контурна обробка плоских виробів постійної невеликої товщини (коли струмінь рідини відхиляється від початкового напрямку руху на величину, не більшу за  $0,5d_c$ ;

$\Phi_{11}$  – просторова (тривимірна обробка) листових заготовок та заготовок, товщина яких не перевищує  $20d_c$  з низькими подачами ( $s=0,05\dots 0,1s_{omm}$ ).

$\Phi_2$  – обробка матеріалів, товщина яких може змінюватися (без зупинки та переналагодження системи верстата);

$\Phi_3$  – точність і стабільність відтворення контуру (за умови відмінності властивостей заготовок однієї партії)

$\Phi_4$  – якість різки (при роботі з подачами до  $0,5s_{omm}$ ;

$\Phi_5$  – продуктивність та ефективність різки шляхом підтримання оптимальних умов протікання процесу струминної ерозії у зоні натікання струменя;

$\Phi_6$  – обробка різних матеріалів без виконання налагоджувальних робіт з максимально досяжною продуктивністю.

Для виконання певних поданих вище функцій система верстата повинна мати визначені матеріальні носії (блоки або модулі), кожен з яких самостійно або шляхом сполучення з іншими носіями забезпечував би виконання заданої функції з мінімальними витратами (матеріальними, енергетичними та ін.).

Визначимо необхідну сукупність матеріальних носіїв заявлених функцій  $\Phi_1$ - $\Phi_6$ . З цією метою складемо табл. 5, в якій в один із стовпчиків занесемо всі необхідні модулі (складові) технологічного обладнання без особливої конкретизації, які б забезпечували виконання певних функцій.

Табл. 5 складена за умови, що функція забезпечується мінімальною кількістю матеріальних носіїв, причому ті, які вже входять до складу верстата у явному вигляді, при описі подальших функцій опускаються.

Наприклад, точність і стабільність відтворення контуру (функція  $\Phi_3$ ) забезпечується зворотним зв'язком по координатам у приводах подач та жорсткістю системи, однак приводи подач уже були внесені до таблиці, а несуча система існує у верстата вже за визначенням. Отже, до табл. 5 будуть занесені тільки ті складові, що є додатковими до вже визначених.

Цим виключається початкове перебільшення кількості дубльованих складових, необхідних для забезпечення функцій верстата.

Відповідно до табл. 5 отримано сукупність (множину) модулів, які необхідні для забезпечення множини функцій:

$$M \in \{M_1; M_2 \dots M_{14}\}$$

Ця сукупність складається з 14 компонент, які можна уявити у вигляді підмодулів нижчого рівня, тобто привод подач  $M_1$  являтиме собою сполучені двигун  $M_{11}$ , механізм передачі  $M_{12}$ , виконуючий пристрій  $M_{13}$ , контрольний пристрій (для приводів із ланкою зворотного зв'язку)  $M_{14}$  і т.і.

Кожна складова може забезпечувати функцію або самостійно, або разом із іншою складовою (кількома складовими); одна із складових може створювати умови для функціонування іншої, певні складові дублюють функції одне одної.

Таким чином, можна записати, що виконання функції наприклад  $\Phi_1$  обумовлене роботою приводів подач разом із системою керування:

$$\Phi_1 = \{(M_1 \wedge M_2) \wedge M_4\} - \text{обробка контуру};$$

$$\Phi'_1 = \{(M_1 \vee M_2) \wedge M_4\} - \text{із обмеженнями (працює один із приводів)}.$$

Аналогічно для інших функцій:

$$\Phi_{11} = \{(M_1 \wedge M_2) \wedge M_4 \wedge M_3\}$$

$$\Phi_2 = \{\Phi_1 \wedge M_5 \wedge M_6 \vee \Phi_1 \wedge M_5 \wedge (M_1 \wedge M_2)\}$$

$$\Phi_3 = \{\Phi_1 \wedge M_7\}$$

$$\Phi_4 = \{\Phi_1 \wedge M_5 \wedge M_6 \vee \Phi_1 \wedge M_5 \wedge (M_1 \wedge M_2)\} \text{ особливим алгоритмом керування приводами подач } M_1 \text{ і } M_2.$$

$$\Phi_5 = \{\Phi_1 \wedge M_{10} \wedge M_{11} \vee \Phi_1 \wedge M_7 \wedge (M_{10} \wedge M_{11}) \vee \Phi_1 \wedge M_{10}\}$$

$$\Phi_6 = \{\Phi_1 \wedge M_{10} \wedge M_{11} \vee \Phi_1 \wedge \Phi_3\}.$$

Подані рівняння дають змогу побудувати граф забезпечення функцій матеріальними носіями (рис. 5).

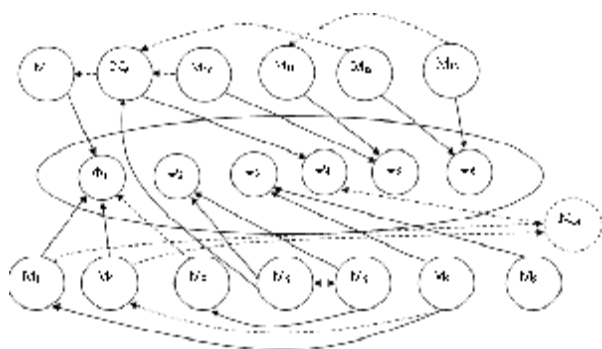


Рисунок 5 – Граф забезпечення функцій верстата матеріальними носіями

Граф (рис. 5) дає змогу відразу виявити певні зв'язки, які показують дублювання функцій. Можна записати такі співвідношення:

$$M_6 \in M_5;$$

$$M_{11} \in M_{13};$$

$$M_9 = M_{12};$$

$$M_5 \in M_9.$$

Виходячи з того, що сукупність властивостей  $W$  забезпечується сукупністю матеріальних носіїв  $M$ , кожен з яких представлений окремим модулем (складовою), сукупність  $W$  визначиться як

$$W = \sum_j \sum_i M_j(\Phi_i)$$

Це дає змогу записати рівняння, що визначає склад верстата з урахуванням забезпечення окремих функцій визначеними складовими без їхньої деталізації. Після перетворення отримано рівняння:

$$W = \sum M(\Phi_i) = \{(M_1 \wedge M_2) \vee (M_3 \wedge M_1 \wedge M_2)\} \wedge$$

$$\wedge M_7 \wedge M_9 \wedge M_{13} \wedge M_5\}$$

Винесення носія із  $M_3$  доводить варіантність рішення (наприклад, у вигляді опції, яка подається у разі необхідності, однак верстат працює і без даного елемента). Система контролю товщини  $M_5$  також може бути виконана у кількох варіантах.

Таким чином, для структурної формули  $3_{xy}XYOz\bar{P}_z M$  (C15) та  $3_{xy}XYOz\bar{P}_z M_1 M_2$  (C16) рівняння складових виглядатиме:

$$W = \sum M(\Phi_i) = \{(M_1 \wedge M_2) \vee (M_3 \wedge M_1 \wedge M_2)\} \wedge$$

$$\wedge M_7 \wedge M_9 \wedge M_{13} \wedge M_5\}$$

Отже, це дає змогу отримати компонування обладнання у вигляді, поданому на рис. 6,б (для порівняння на рис. 6,а наведено компонування типового гідрорізного верстата).

Конструктивне виконання окремих елементів гідрорізного верстата дало змогу довести ефективність запропонованого компонування рішення та отримати пласкі заготовки із армованих композитів достатньо високої якості. Так на рис. 7 подані фото торцев різу заготовки з текстоліту товщиною 15 мм. На фото чітко видно. Що при обробці значного відхилення струменя від початкового напрямку не спостерігається. Відтоді точність відтворення форми залишається високою.

Наразі фахівцями кафедри ведуться роботи щодо створення моделі гідрорізного верстата запропонованого компонування рішення, конструктивне виконання якого подане на рис. 8. У якості несучої системи використано станину та силові рухомі блоки верстату ЛТ260МФ3; струминну головку разом із системою слідкування оптимальної відстані до оброблюваної поверхні встановлено на вертикальному рухомому блоці.

Привода подач доопрацьовано відповідно до вимог щодо динамічної точності робочих органів верстата запропонованого компонування.

Використана система керування забезпечує одночасну роботу двох крокових двигунів типу ШД5.

**Таблиця 4 – Основна морфологічна матриця ТОС гідрорізання**

Заготовка			Робочий процес		Інструмент		Засіб контролю	
1. Тип	2. Вид	3. Рух	4. Стан	5. Вид взаємодії	6. Рух	7. Параметри	8. Вид	9. контр. параметр
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.1. однорідна пласка 1.2. однорідна профільна 1.3. композит плаский 1.4. композит профільн. 1.5. однорідна із включеннями	2.1. пласка тонка 2.2. пласка різнотовщинна 2.3. короб-часта	3.1. контурн. площинний 3.2. контурн. просторов. 3.3. вібраційний лінійний 3.4. вібраційний площинний 3.5. нема	4.1. незмінні умови 4.2. змінні	5.1. безперервна обробка 5.2. циклічно повтор. 5.3. імпульсна	6.1. поступальн. контурний 6.2. контурний. просторовий 6.3. обертовий 6.4. осцилюючий 6.5. вібраційний 6.6. нема	7.1. постійні дії 7.2. змінні	8.1. циклічної дії 8.2. періодичної дії 8.3. постійної дії 8.4. нема	9.1. шум 9.2. світлові характеристики 9.3. індуктивні 9.4. теплові 9.5. тактильні 9.6. нема

**Таблиця 5 – Основні функції верстата та їх матеріальні носії**

№ п/п	Функція верстата	Матеріальний носій	Додаткові функції	Примітка
1	Обробка складних контурів ( $\Phi_1$ ), обробка простор. фігур ( $\Phi_1'$ )	Привод X $M_1$ Привод Y $M_2$ (Привод Z) $M_3$ Сист. керув. $M_4$	Можливий осциляційний рух	
2	Обробка матеріалів різної товщини ( $\Phi_2$ )	Система контролю товщини $M_5$ Привод Z $M_6$	Забезпечення орієнтації датчиків	
3	Точність і стабільність відтворення контуру ( $\Phi_3$ )	Зворотний зв'язок по координатам $M_7$ Жорсткість $M_8$		
4	Забезпечення якості ( $\Phi_4$ )	Система моніторингу $M_9$	Можлива комбінація з $\Phi_2$	Забезпеч. позиційов. $M_3$ та $M_1 \vee M_2 = M_{14}$
5	Забезпечення продуктивності та ефективності ( $\Phi_5$ )	Система моніторингу $M_{10}$ Алгоритм оптимізації $M_{11}$		
6	Обробка різних матеріалів ( $\Phi_6$ )	Система моніторингу $M_{12}$ Алгоритм керування $M_{13}$		

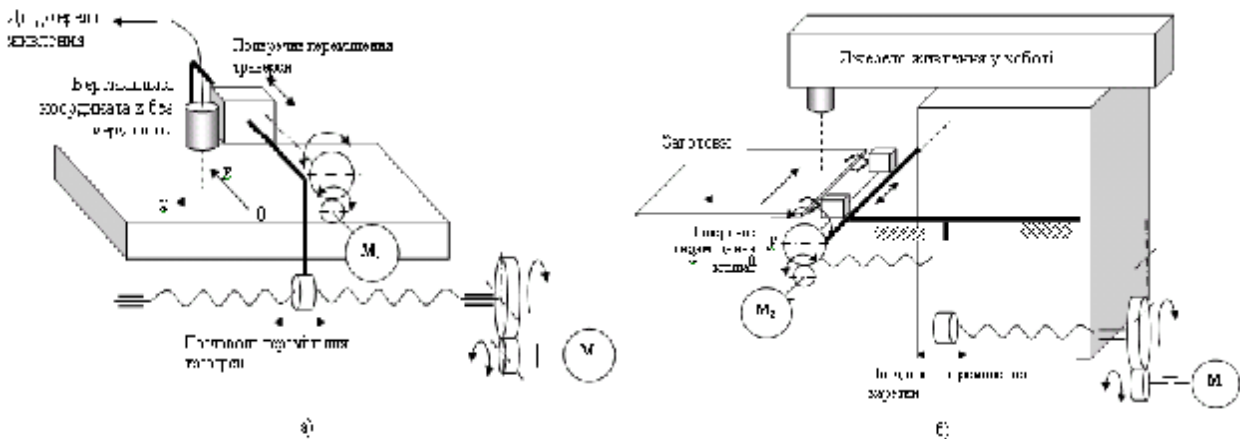


Рисунок 6 – Схеми гідрорізних верстатів типового конструювання (а) та пропонуваного із кліщовими тримачами заготовки (б)

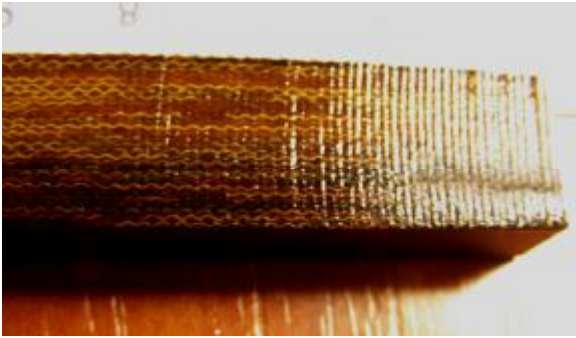


Рисунок 7 – Фото торця різа текстолітної заготовки товщиною 15 мм, отримане з використанням розроблених елементів

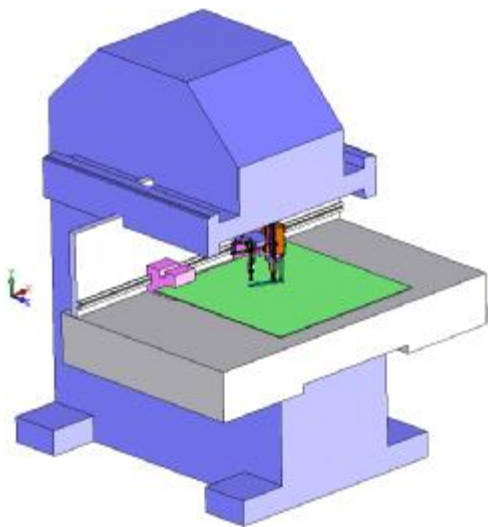


Рисунок 8 – Конструктивне рішення гідрорізного верстата пропонуваного компоунвання

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили поширити принципи опису компоунвань металообробних верстатів за допомогою структурних формул на гідрорізні верстати. Встановлено, що для виявлення оптимальної структурної формули повинні враховувати ланцюги систем контролю процесу струминного різання. Це дало змогу описати типові верстати та виявити можливі нові компоунвання для виконання окремих розкрійних операцій. Без урахування ланцюга контролю гідрорізного верстата з 3-рухомими і 1 нерухомим можуть бути виконані у 84-х варіантах. Морфологічний аналіз дозволив згрупувати варіанти компоунвань та показав, що існує 6 базових варіантів компоунвань гідрорізного обладнання, серед яких 4 – принципово нові.

Виявлений ряд компоунвань дозволив установити, що найбільш універсальним є обладнання, компоунвання якого відповідає структурним формулам:  $3_{xy}XUM^1Oz\bar{P}_z(p_b,c)M^2$  - варіанти компоунвань обла-

днання, в якому індукційний контроль стікання струменя виконується постійно, однак у першому випадку заготовка і один з елементів датчика залишається нерухомим, а переміщення здійснює струминна головка, а у другому випадку контурний рух подачі здійснює саме заготовка;  $3_{xy}XYOz\bar{P}_zM$  (або  $3_{xy}OXYz\bar{P}_zM$ ) - варіант виконання оптичної системи, в якій датчик контролю встановлений на струминній головці, рух подачі здійснює заготовка;  $3_{xy}XYOz\bar{P}_zM_1M_2$  - варіант виконання системи моніторингу з двома датчиками, наприклад, тактильним для підтримання оптимальної відстані між оброблюваною поверхнею та соплом, та оптичним – для забезпечення оптимальних умов протікання нестационарних процесів струминної ерозії.

Усі ці варіанти передбачають надання руху подачі заготовці.

Виявлені компоунвання призводять до набуття гідрорізальним обладнанням нових властивостей, а саме: забезпечення стабільності умов протікання струминної ерозії за рахунок незмінності схеми технологічного налагодження (зокрема, силової схеми взаємодії розташованої на столі верстата листової заготовки і швидкоплинного струменя), істотного спрощення системи контролю процесу струминної ерозії за рахунок нерухомості струминної головки.

Перебір та порівняння різних ефектів, що супроводжують процес струминної ерозії, а також урахування конструктивних особливостей засобів виміру показало, що найбільш доцільним є контроль процесу за допомогою оптичних пристроїв. При цьому чинником контролю є інтенсивність світла, а параметром регулювання технологічної системи – швидкість контурної подачі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Врагов Ю.Д. Анализ компонок металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
2. Коваленко В.С., Романенко В.В., Олещук Л.М. Малоотходные процессы резки лучом лазера. – К.: Техника, 1987. – 112 с.
3. Саленко О.Ф., Антоненко О.В. Про керованість процесу струминного різання ортотропних композитів/ Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 6/2003(23). - С. 77-83.

Стаття надійшла 25.01.2008.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Драгобецьким В.В.