

УДК 621:30.050

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОРЕЗАНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕХАНОТРОННЫХ СИСТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ****В. Н. Орел, В. Т. Щетинин, А. Ф. Саленко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: deoxis@inbox.ru

Рассмотрены возможности использования механотронных систем в приводе подачи гидроструйного оборудования. Показано, что создание предварительного нагружения за счет такого привода в зоне резания существенно повышает производительность процесса при струйном резании на 25–35 %. Проведено компьютерное моделирование нагружения листовой заготовки с определением зон напряжений, при различных воздействиях (растягивающая сила, крутящий момент и комбинированное воздействие силы и момента). Определены оптимальные толщины листовых заготовок, при которых использование предварительного нагружения является энергетически целесообразным. Определена зависимость эффективности и угла направления создаваемых нагрузок к касательной траектории перемещения струйной головки. Разработана структурная схема гидрорезного оборудования, оснащенного схватами с механотронными приводами для микроперемещений.

**Ключевые слова:** механотронные устройства, контурная резка, напряженное состояние.**ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ГІДРОРІЗАННЯ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ МЕХАНОТРОННИХ СИСТЕМ ПОПЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ****В. М. Орел, В. Т. Щетинин, О. Ф. Саленко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: deoxis@inbox.ru

Розглянуто можливості використання механотронних систем в приводі подачі гідроструменевого обладнання. Показано, що створення попереднього навантаження, за рахунок такого приводу, в зоні різання істотно підвищує продуктивність процесу при струйному різанні на 25–35%. Проведено комп'ютерне моделювання навантаження листової заготовки з визначенням зон напруг, при різних впливах (сила, що розтягується, крутий момент і комбінований вплив сили і моменту). Визначено оптимальні товщини листових заготовок, при яких використання попереднього навантаження є енергетично доцільним. Визначено залежність ефективності і кута напряму створюваних навантажень до дотичної траєкторії переміщення струменевої головки. Розроблено структурну схему гідролізного обладнання, оснащеного схопами з механотронними приводами для мікропереміщень.

**Ключові слова:** механотронні пристрої, контурне різання, напружений стан.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В современном машиностроении все большее распространение получают различные механотронные системы, позволяющие улучшить качество регулируемых рабочих процессов, сократить количество информационных каналов, повысить гибкость системы в целом.

Использование механотронных систем в рабочих приводах технологического оборудования также дает возможность уйти от жестких рамок регулирования и решать задачи, которые в традиционном представлении требуют наличия множества вспомогательных устройств, механизмов и информационных потоков.

Создание определенных условий протекания рабочего процесса является одним из направлений повышения эффективности обработки материалов резанием. Известно, что для гидрорезания получения новых поверхностей раздела интенсифицируется созданием напряженного состояния в поверхностном слое и по сечению обрабатываемой заготовки [1]. Автор [2] предлагает разделять рабочие движения на формообразующие и интенсифицирующие. Однако, поскольку технические решения для реализации идеи разделения движений остаются достаточно сложными и энергоемкими, поиск рациональных схем и приемов выполнения обработки является важной и актуальной научно-технической задачей, решение которой дает воз-

можность существенно повысить энергоэффективность гидрорезания листовых материалов.

Появление систем механотроники, и уменьшение массогабаритных параметров привода приводит к тому, что механотронные системы могут быть основой для создания адаптивных систем приводов рабочих перемещений.

Целью данной работы является оценка возможности повышения эффективности контурного резания за счет введения дополнительных средств рабочего нагружения в виде системы микроприводов, работающих в области упругих деформаций, компенсирующих упругих элементов захватных устройств.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В [1, 3] было высказано предположение, что повысить эффективность обработки можно за счет повышения напряженного состояния в зоне резания, например путем создания растягивающих напряжений в направлении, перпендикулярном движению рабочей подачи. Однако для контурного резания с произвольным движением струйной головки задача решена не была, поскольку перемещение струйной головки выполняется под постоянно изменяющимися углами относительно главных координатных осей привода.

При использовании привода с упругими элементами для гидрорезного станка компоновочного решения, представленного на рис. 1 (с удержанием заготовки клещевыми захватными элементами, распо-

ложенними на рычажной системе рабочих перемещений), создание напряженного состояния в листовой заготовке возможно использованием:

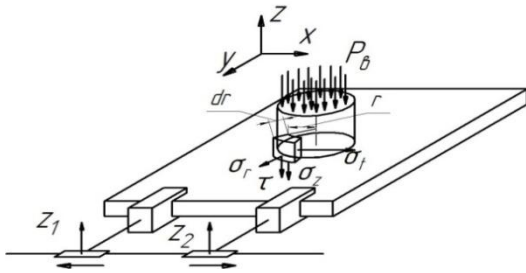


Рисунок 1 – Компонівка гидрорезного станка с подвижной заготовкой и подвижной в вертикальной плоскости струйной головкой (неподвижной в плоскости XOY)

1) приводов продольного перемещения вдоль OX (рис. 2), при котором в области упругих деформаций в зоне резания формируются растягивающие напряжения;

2) приводов поворотного движения относительно OZ в точках захвата, при использовании которых растягивающие напряжения формируются в отдаленной в направлении OY зоне, а в месте схвата – сжимающие;

3) одновременного использования приводов поворотного и продольного перемещений, что дает возможность изменять положение наиболее нагруженной зоны вдоль OY.

Предусматривается что в местах захвата с пятом контакта возможна установка вспомогательных приводов, обеспечивающий предварительное нагружение заготовки в зоне резания растягивающей силой, возникающей за счет линейного микроперемещения вдоль оси OX, а также силами, возникающими за счет поворота вокруг вертикальной оси OZ, т.е. совершения движения с1 и с2.

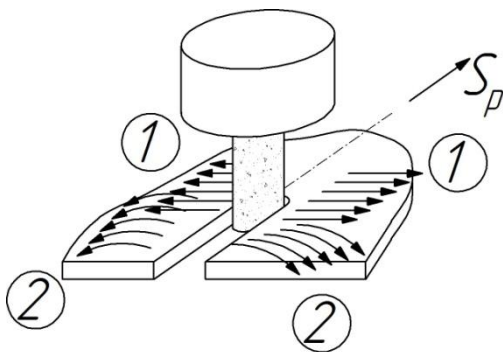
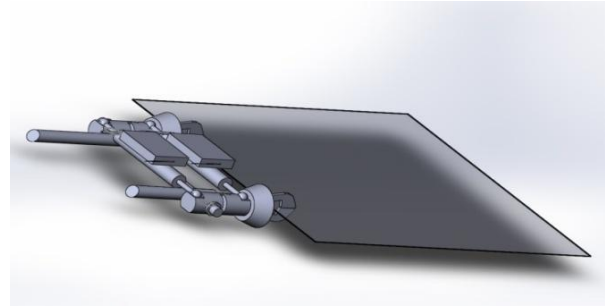
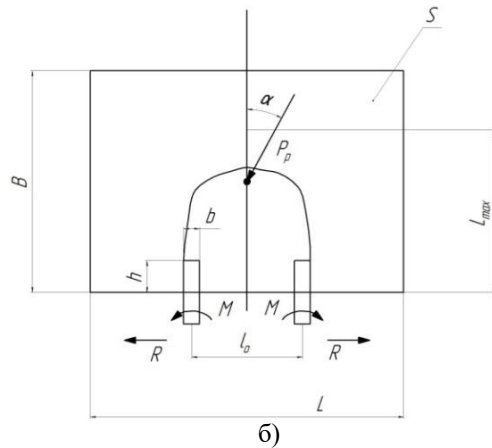


Рисунок 2 – Создание напряженного состояния заготовки в зоне резания

Таким образом, возможны три варианта создания напряженного состояния в зоне резания (рис. 3): растяжение от продольного перемещения схватов 1, от поворота схватов вокруг оси z1 и z2 2, а также от их одновременного действия 1+2, что дает возможность изменять форму эпюры нагружения, перераспределять сжимающие и растягивающие напряжения в слое заготовки относительно начала координат XYZ.



а)



б)

Рисунок 3 – Схваты с приводами микроперемещений (а) и расчетная схема листовой заготовки с зоной предварительного нагружения (б)

Напряжение в микрообъемах заготовки в точке натекания струи определяется по известным [4] соотношениям, установленных для площадки  $ds$ , расположенной под углом  $\alpha$  относительно главных осей:

$$\sigma_a = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3 \cdot \cos^2 \alpha_3 \quad (1)$$

$$\tau_a = \sqrt{\sigma_1^2 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2^2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3^2 \cdot \cos^2 \alpha_3 - \sigma_a^2} \quad (2)$$

При этом для вертикального расположения оси OZ и случая симметричности нагружения согласно расчетной схеме фиг. 2 имеем:

$$\sigma_a = \sigma_n \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2) + \sigma_3 \cdot \cos^2 \alpha_3 \quad (3)$$

$$\tau_a = \sqrt{\sigma_n^2 \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2) + \sigma_3^2 \cdot \cos^2 \alpha_3 - \sigma_a^2} \quad (4)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы, образования нормально площадки с направлением действия силы приводов R и струи;  $\sigma_1, \sigma_2$  – напряжения, обусловленные действием привода микроперемещений, установленных в захватном механизме.

Ориентация площадки обусловлена направлением движения рабочей подачи; таким образом, привод должен обеспечивать такое напряженное состояние в зоне резания, которое интенсифицирует процесс только в нужном направлении. Как правило, это направление, перпендикулярное касательной к контуру резания.

Действия струи на выделенной микрообъем поверхности, определяется так:

$$\begin{cases} \sigma_r = 2G \cdot \left( \frac{du}{dr} + \frac{v\varepsilon}{1-2\nu} \right) \\ \sigma_t = 2G \cdot \left( \frac{u}{r} + \frac{v\varepsilon}{1-2\nu} \right) \\ \sigma_z = 2G \cdot \left( \frac{dH}{dz} + \frac{v\varepsilon}{1-2\nu} \right) \\ \tau = 2G \cdot \left( \frac{dH}{dz} + \frac{dH}{dr} \right) \end{cases} \quad (5)$$

где  $\frac{du}{dr} = \varepsilon_r$  – радиальная деформация;  
 $\frac{dH}{dz} = \varepsilon_z$  – осевая деформация;  
 $\frac{u}{r} = \varepsilon_t$  – тенгенциальная деформация.

Тогда условия равновесия выделенного элемента будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} + \frac{d\tau}{dz} = 0 \\ \frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d\tau}{dr} + \frac{\tau}{r} = 0 \end{cases}$$

А дифференциальные уравнения перемещения в вертикальном и горизонтальном направлениях U и H можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} (1-2\nu) \cdot \left( \Delta U - \frac{U}{r^2} \right) + \frac{d\varepsilon}{dr} = 0 \\ (1-2\nu) \cdot \Delta H + \frac{d\varepsilon}{dz^2} = 0 \\ \Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{rdr} + \frac{d^2}{dz^2} \end{cases}$$

Одновременное действие струи и растягивающего нагружения на тонкую пластину - обрабатываемую заготовку – вызывает сложное напряженно-деформированное состояние заготовки с перемещениями U и H. Перемещение U в конечном итоге будет определять погрешность контура реза.

Проведение модельных экспериментов потребовало создания расчетной модели специальных схватов для получения и рабочего перемещения листовых заготовок размером В×L с установленными дополнительными механо-тронными приводами микроперемещений, что позволяет схему зоны резания представить в соответствии с рис. 3.

Для решения поставленной задачи были приняты во внимание следующие параметры процесса:

- внешние усилия, создаваемые приводом: сила R и момент M (которые приняты одинаковыми);
- нагрузка P и угол приложения нагрузки α струи жидкости;
- геометрические параметры захвата, расстояние между схватами l0; ширина b и длина h зоны захвата.

Для оценки скорости удаления материала при условии создания дополнительного нагружения зоны резания воспользуемся эмпирической формулой, представленной в [5]:

$$Q = 0,106 \cdot \left( \frac{P}{100} \right)^{2,4} \cdot d_c^{-0,27} \cdot h^{-0,35} \cdot \left( \frac{\sigma'}{100} \right)^{-0,75}$$

где P – давление в г/с, МПа;  
 $d_c$  – диаметр стройной насадки, мм;  
h – толщина обрабатываемого материала, мм;  
 $\sigma'$  – запас прочности материала как разница  $\sigma_p - \sigma_H$ , где  $\sigma_H$  напряжения, создаваемое приводом подачи.

Такое допущения возможно на основе результата анализа [6], однако величина  $\sigma_H$  будет зависеть от положения площадки разрушения на фронте гидро-резания и направления перемещения струйной головки относительно оси симметрии дополнительно создаваемой нагрузки.

Далее определяли размеры зоны напряженно-деформированного состояния заготовки и максимально возникающие вне контакта со схватами напряжения (рис. 4). При этом исходили из условия, что усилия на контактных площадках схватов не должны превышать предел текучести материала [σт], а максимальные усилия определяются трением контакта, т.е.  $R_{max1} = 2\mu_p P_n$ ,  $P_n < kbl \cdot [\sigma_m]_k$  – коэффициент запаса, предотвращающей деформирование заготовки и ее повреждение в месте контакта.

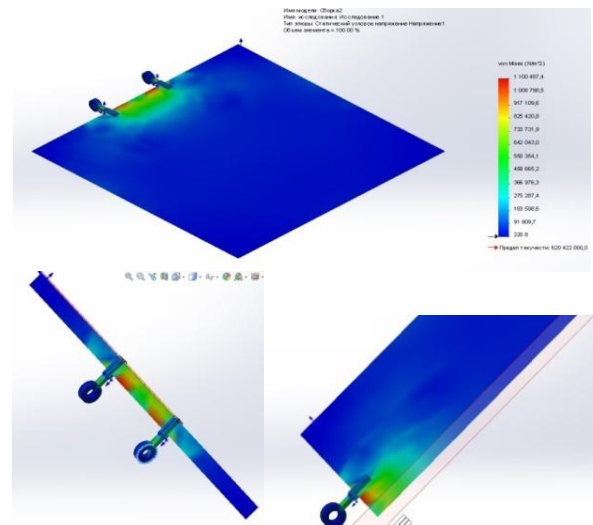


Рисунок 4 – Примеры расчета статических узловых напряжений на модели листовой заготовки, воспринимающей нагружения от механотронного привода микроперемещений

Еще одним ограничением была величина нагрузки

$$R_{max2} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{4L^2}$$

, при которой листовая заготовка могла потерять устойчивость с последующим ее кораблением. Тут L – расстояние между схватами;  $J_{min}$  – минимальный момент инерции, для данного случая  $J^x$ .

Поскольку заготовка по определению является нежесткой, существенное влияние на повышение устойчивости оказывает ее вес, равномерно распределенный по опорной поверхности. Таким образом, были получены эпюры распределения напряжений

для листових заготовок из СВА и PVC-пластика толщиной 2,5 мм для определенных геометрических параметров рабочей зоны.

Полученные эпюры распределения напряжений позволили провести анализ влияния условий нагружения заготовки на эффективность процесса гидрорезания.

Установлено, что работа привода 1 (линейного нагружения схватов) вызывает растягивающие напряжения в слое заготовки с осе симметричной спадающей эпюрой, перпендикулярной оси привода (рис.5, а), в то время как приложение момента поворота к схватам изменяет картину и вызывает появление напряжений только в некотором удалении от оси схватов, больших по своей величине на 20–40 % (рис. 5, б).

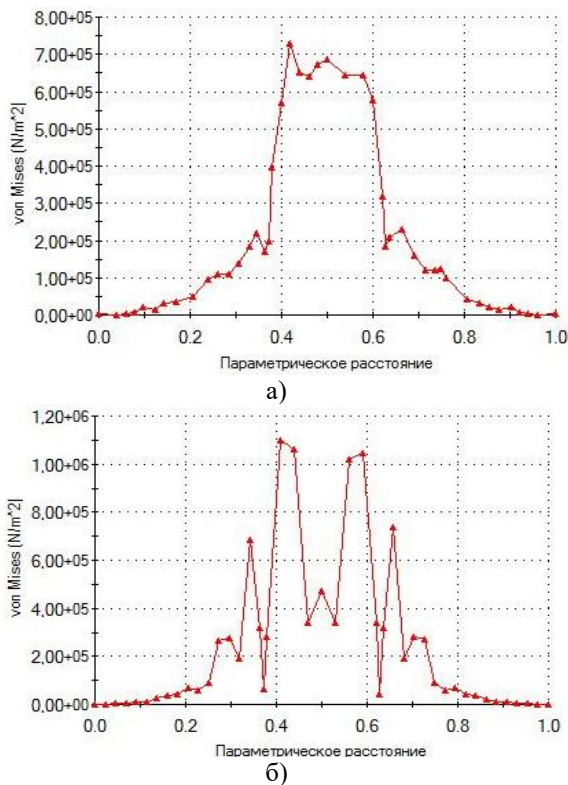


Рисунок 5 – Эпюра статических узловых напряжений, полученных при моделировании нагружения заготовки линейным микроперемещением схватов (а) и поворотным (б)

При этом требуемое напряженное состояние достигается только в непосредственной близости от точек захвата (параметрическое расстояние 0,07–0,09) что для листа шириной 500 мм ограничивается 50–100 мм от торца схватов (рис. 6). Размеры схватов, условия контакта и расположение схватов относительно торца оказывают незначительное влияние на возникающих напряжения и характер их распределения.

Выполнен анализ изменения производительности резания при перемещении вдоль оси симметрии схватов привода. Нетрудно заметить, что повышение производительности существенно в зоне возникновения максимальных растягивающих напряжений, при удалении от которой на расстоя-

ние L=130 мм процесс гидрорезания протекает как и в обычных условия (рис. 7, а).

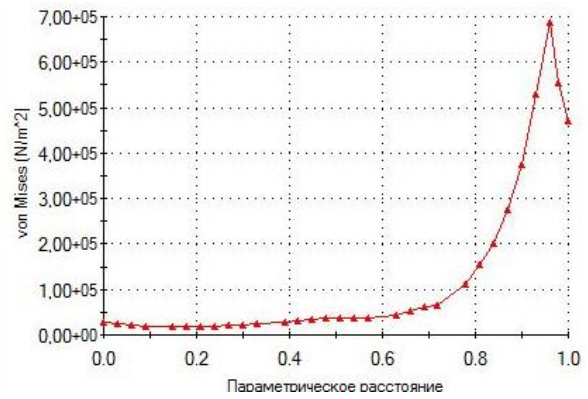


Рисунок 6 – Изменение величины растягивающих напряжений вдоль ОУ по оси симметрии привода (по горизонтали показано относительное расстояние, начало координат у правого края)

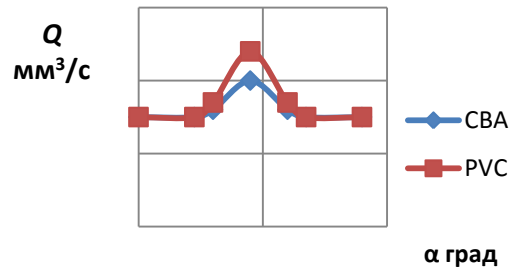
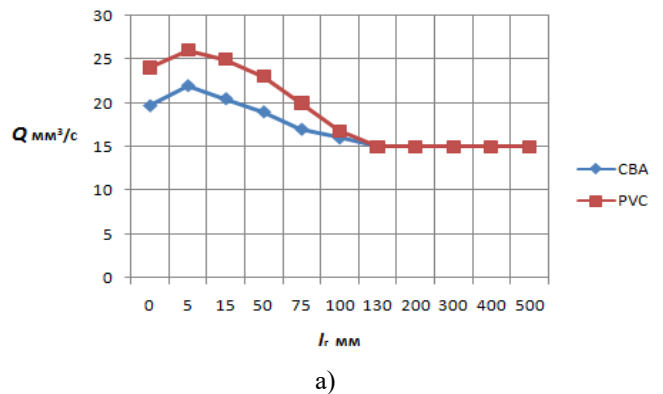


Рисунок 7 – Изменение производительности процесса, выраженное через объемный сьем материала при гидрорезании в зависимости от расстояния от кромки схватов (а) и угла между касательной к контуру реза и осью симметрии рабочего органа (б)

При этом угол наклона касательной к траектории движения  $\alpha$  также оказывает существенное влияние на повышение объемного съема материала Q (рис. 7, б). Из результатов расчета очевидно, что максимальное значение угла  $\alpha$  при обработке не должно превышать значений  $\pm\pi/4$ , что позволяет построить диаграмму эффективных направлений обхода контура (рис. 8), для которых повышение производительности при резании будет иметь место.

Обход контура по другим направлениям должен осуществляться без дополнительного нагружения и с меньшей скоростью рабочей подачи  $s$  для обеспечения полного прорезания и соответствующего уровня качества обработки.

Таким образом, полученные результаты являются основой для синтеза мехатронного привода с зависимым регулированием по направлению обхода контура. Угол между касательной к контуру в конкретной точке и осью симметрии рабочего органа является входной координатой как для привода линейного перемещения (создающего нагрузку  $R$ ), так и для привода поворотного перемещения (создающего момент  $M$ ) (рис. 2, 3). Поскольку работа приводов требует дополнительных энергетических затрат, работа с углами  $\alpha \in [-\pi/8; \pi/8]$  и  $\alpha \in [7/8\pi; -7/8\pi]$  должна осуществляться без предварительного нагружения.

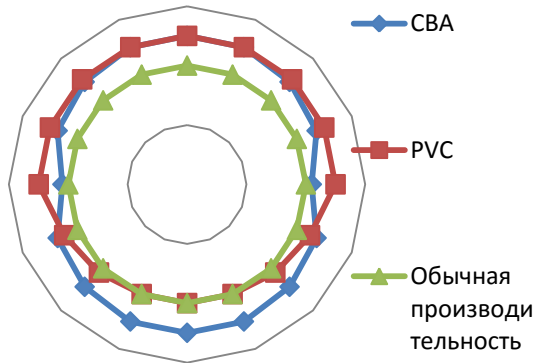


Рисунок 8 – Диаграмма эффективных направлений обхода контура

Структурная схема гидрорезного оборудования, оснащенного схватами с мехатронными приводами микроперемещений показана на рис. 9. За основу взято техническое решение гидрорезного станка с ЧПУ, представленное в [6]. Введение двух дополнительных приводов (линейного нагружения заготовки усилием  $R_n$  нагружения моментом  $M_n$  схватах) предполагает также установление обратной связи ОС<sub>3</sub> для определения направления движения и введения дополнительной линии коррекции скорости рабочей подачи  $K_d$ , сигнал от которой подается на элемент суммирования. Кроме того, привод П1 является ведущим, а привод П2 – ведомым, что предполагает согласование их работы элементами через соответствующие связи и сумматоры соответственно.

Таким образом, полученная интегрированная система интенсификации гидрорезания [7] позволяет при задействовании приводов предварительного нагружения заготовки увеличить производительность обработки вязко упругих листовых материалов типа CBA и PVC небольшой (до 10 мм) толщины на 15–25%, за счет более полного использования мощности основной гидростанции станка.

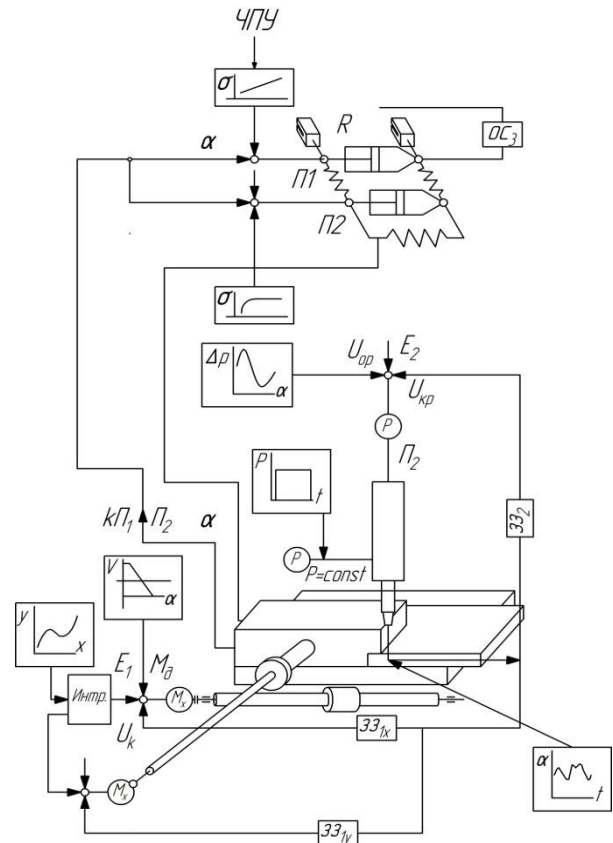


Рисунок 9 – Структурная схема предлагаемого технического решения

Структурная схема для обработки листовых материалов с предварительным нагружением представлена на рис. 10. Привод позиционирования (рабочих перемещений) практически мало чем отличается от традиционных (блок 1 и 2, обеспечивает перемещение по  $x$  и  $y$ ) а элементы линейной и поворотного нагружения представлены блоками 3 и 4 являются мехатронными устройства с пропорциональным электроуправлением. Для этих устройств блок расчета начального нагружения через компонатор подает управляющий сигнал на цепи Ц1 и Ц2, причем дополнительный сигнал компонатор получает от интерполятора выдающего сигнал на привод подачи. Таким образом обеспечиваются требования закон регулирования для создания напряженного состояния по линии, перпендикулярной траектории относительно движения струйного устройства, заготовки.

Обратные связи, предусмотренные в системе привода, обеспечивают более высокую точность параметров регулирования (в частности, координаты и скорости  $x, y, dx/dt, dy/dt$ , а также усилия  $R_n$  и  $M_n$  и как следствие  $\Delta x, \Delta y$ .)

Однако для того, чтобы система приводов не потеряла устойчивость при работе [8], необходимы дополнительные исследования, направленные на установление рациональных параметров механических частей системы ориентирования, в частности, размеров элементов привода и удерживающих схватов, точности [9–10] сочленений  $C1...Ci$ , коэффициента демпфирования, свойств гидролиний и т.д.

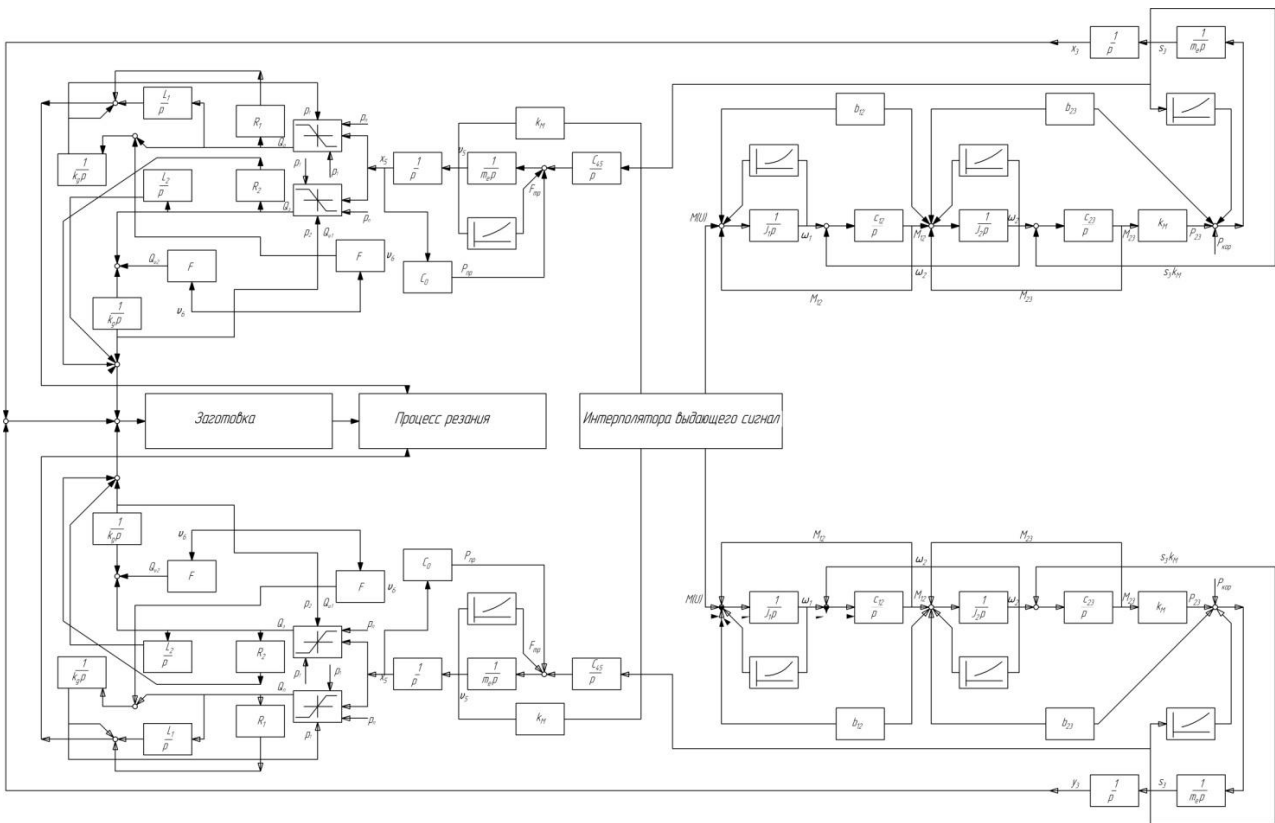


Рисунок 10 – Структурная схема мехатронного устройства

**ВЫВОДЫ.** Нами показано, что применение мехатронных микроперемещений приводов в системе удержания и перемещения листовых заготовок при гидрорезании позволяет повысить производительность процесса при струйном резании до 25–35%, что несмотря на возрастающие на 3–5% энергозатраты является довольно эффективным решением.

Установлено, что наиболее эффективно резание с созданием предварительного нагружения тонколистовых заготовок с пределом прочности до 90 МПа (PVC-пластиков, PP-пластмасс, некоторых композиционных материалов – стеклотекстолитов СВА и т.д.). При этом с увеличением толщины свыше 5–6 мм эффект снижается (несмотря на повышение предварительного нагружения начинают сказываться особенности процессов разупрочнения и деструкции на фронте разрушения) и при обработке материалов толщиной свыше 15 мм он сопоставим с дополнительными энергозатратами.

Направление создаваемых нагрузок должно быть ориентировано под прямым углом к касательной траектории перемещения струйной головки, при этом увеличение угла отклонения до 20–30° приводит к небольшому снижению эффекта (не более 10%) а дальнейшее увеличение угла – к нарастающему снижению; при углах свыше 75° эффект отсутствует.

Требуемое направление нагружения для широкого диапазона углов касательных к контуру резания может быть обеспечено совместным нагружением схватов линейным и вращательным микроперемещениями, усилие которых ограничивается силой трения в месте контакта схватов с обрабатываемой листовой заготовкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петко И.В., Кедровский В.Г. Моделирование процессов резания неметаллических материалов гидроструей высокого давления // Известия вузов «Технология легкой промышленности». – №4. – 1987. – С. 127–131.
2. Тихомиров Р.А., Гуенко В.С. Гидрорезание неметаллических материалов. – Киев: Техника, 1984. – 160 с.
3. Саленко О.Ф., Струтинський В.Б., Загірняк М.В. Ефективне гідрорізнання. – Кременчук: вид-во КрНУ, 2008. – 488 с.
4. Основский Л.А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель, 2007. – 290 с.
5. Salenko, O. et all (2014), «Improving accuracy of profile hydro-abrasive cutting of plates of hardmetals and superhard materials», *Sverkhтвердые Materialy*, Vol. 36, No. 3, pp. 73–84, DOI 10.3103/S1063457614030083.
6. Антоненко О.В., Саленко О.Ф., Луговая О.В. Принципи створення адаптивних систем для керування процесом гідрорізнання на базі низькопотужного лазера // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – Вип. 6(29)/2004. – С. 93–97.
7. Загірняк М.В. Процес і обладнання стуминно-лазерного різання: монографія. – Харків: Мадрид, 2013. – 312с.
8. Salenko, A.F., Fomovska, O.F., Dudyuk, V.A., Mana, O.M. (2010), «About some results of exploration of water jet guided laser onto the solid surface», *Unitex – 10: International scientific conference. Gabrovo, November 19 – 20*, pp. 414 – 421.

9. Кузнецов Ю.Н. Генетико-морфологический принцип создания станков нового поколения // Вісник СевНТУ. – Вип. 110: Механіка, енергетика, екологія: збір. наук. праць. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 3–12.

10. Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А. Концепция

гибридных компоновок станков с параллельной кинематикой на модульном принципе // Материалы Междунар. науч. конф. «Техника, технологии и системы Tekhsis 2009». – Plovdiv: Technical University Sofia, 2009. – PP. 19–36.

### IMPROVING THE PERFORMANCE OF WATERJET CUTTING OF BLANKS AT USING THE MECHATRONIC SYSTEMS OF PRELOAD

V. Orel, V. Shchetinin, A. Salenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: deoxis@inbox.ru

**Purpose.** The aim of this study is to evaluate the possibility of increasing the effectiveness of contour cutting through the introduction of additional means of working load in the form of microdrives system, working in the field of elastic deformations of the elastic compensating elements of gripping devices. **Methodology.** The computer simulation of the loading of the slab with the definition of areas of strain, with various influences (tensile force, torque and combined effect of force and torque) was conducted. **Results.** We have shown that the use of mechatronic drive microdisplacements in system of retention and movement of sheet blanks at a waterjet cutting process can increase productivity at a jet cutting to 25–35%, that despite increasing by 3–5% of the energy consumption is quite an effective solution. **Originality.** Implementation of simulation experiments required the creation of computational model of special grippers for the loading and traversing of sheet blanks BxL size with the supplementary mechatronics microdisplacement drives, which allows to present the cutting zone in accordance with the presented scheme. **Practical value.** It was found that the most effective cutting with the creation of the pre-loading of sheet blanks is with a tensile strength up to 90 MPa (PVC-plastics, PP plastic materials, certain composite materials - glass fiber laminate CBA, etc.). At the same time with an increase in the thickness more than 5–6 mm the effect is decreasing (despite the increase in pre-loading it is starting to affect the characteristics of the processes of softening and destruction on the front of destruction), and in the processing of materials with thickness over 15 mm, it is comparable to the additional energy. References 10, figures 10.

**Key words:** mechatronic devices; contour cutting; strain stressed state.

#### REFERENCES

1. Petko, I.V., Kedrovskiy, V.G. (1987), "Modeling of processes of cutting non-metallic materials hydro jet of high pressure", *Izvestiya vuzov «Tehnologiya legkoy promyshlennosti»*, no.4, pp. 127–131.

2. Tihomirov, R.A., Guenko, V.S. (1984), *Gidrorozaniye nemetallicheskih materialov* [Waterjet cutting of non-metallic materials], Tekhnika, Kyiv, Ukraine.

3. Salenko, O.F., Strutynskiy, V.B., Zagirnyak, M.V. (2008), *Efektivne gidrorizannya* [Effective waterjet cutting], KrNU publishing house, Kremenchuk, Ukraine.

4. Sosnovskiy, L.A. (2007), *Mekhanika iznosostalostnogo povrezhdeniya* [Mechanics of weary damage], Gomel, Belorussia.

5. Salenko, O. et al. (2014), "Improving accuracy of profile hydro-abrasive cutting of plates of hardmetals and superhard materials", *Sverkhverdye Materialy*, vol. 36, no. 3, pp. 73–84.

6. Antonenko, O.V., Salenko, O.F., Lugova, O.V. (2004), *Pryntsypy stvorenniya adaptivnykh system dlya keruvannya protsesom gidrorizannya na bazi nyz'kopotuzhnogo lazera* [The principles of creation of adaptive systems for control of waterjet cutting process based on low powerful laser], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no 6(29), pp. 93–97.

7. Zagirnyak, M.V. (2013), *Protses i obladnannya stumynno-lazernoho rizannya: monohrafiya* [The process and equipment of laser-jet cutting: monograph], Madrid, Kharkiv, Ukraine.

8. Salenko, A.F., Fomovska, O.F., Dudyuk, V.A., Mana, O.M. (2010), "About some results of exploration of water jet guided laser onto the solid surface", *Unitex – 10: International scientific conference. Gabrovo, November 19 – 20*, pp. 414–421.

9. Kuznetsov, Yu.N., (2010), *Henetyko-morfolohycheskyy pryntsyp sozdanyya stankov novoho pokolenyia* [Genetic and morphological principle the creation of a new generation stankov], SevNTU, no. 110, pp. 3–12.

Kuznetsov, Yu.N., Dmytryev, D.A. (2009), *Kontseptsyya hybrydnikh komponovok stankov s parallel'noy kynematykoj na modul'nom pryntsype* [The concept of hybrid configurations of machines with parallel kinematics on a modular principle], *Materials of International Scientific Conference "Equipment, Technologies and Systems"*, Plovdiv, Technical University Sofia, Bulgaria, pp. 19–36.

Стаття надійшла 01.10.2015.