

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОСТРУЙНОГО РЕЗАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ УПРАВЛЯЕМОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

В. Н. Орел
Аспирант*

E-mail: deoxis24@gmail.com

В. Т. Щетинин

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: Shchetinin23@gmail.com

А. Ф. Саленко

Доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой*

E-mail: salenko2006@ukr.net

Н. Н. Яцына

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: JacinaKoljan@mail.ru

*Кафедра процессов и оборудования
механической и физико-технической обработки
Кременчугский национальный университет
им. Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600

Досліджено можливість підвищення продуктивності гідроструйного різання за рахунок накладання розтяжних напружень на зону струйного впливу. Проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану листової заготовки із визначенням зон напружень на фронті гідрорізання. Показано, що керування нестационарним напруженим станом дозволяє обмежити швидкість зростання тріщини при зростанні продуктивності різання

Ключові слова: гідроабразивне оброблення, оброблення по криволінійному контуру, кероване тріщиноутворення, напружений стан, мехатронні пристрої

Исследована возможность повышения производительности гидроструйной резки за счет наложения растягивающих напряжений на зону струйного воздействия. Проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния листовой заготовки с определением зон напряжений на фронте гидрорезания. Показано, что управление нестационарным напряженным состоянием позволяет ограничить скорость роста трещины при росте производительности резки

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, обработка по криволинейному контуру, управляемое трещинообразование, напряженное состояние, мехатронные устройства

1. Введение

Повышение параметров энергоэффективности и производительности при сложно контурном раскрое листовых заготовок абразивно-жидкостной струей является важной задачей эксплуатации гидроабразивных технологических комплексов, выпускаемых в широком ассортименте зарубежными и украинскими фирмами.

Создание определенных условий протекания рабочего процесса является одним из направлений интенсификации обработки материалов резанием. То же самое касается и процессов гидро- и гидроабразивного резания: изменение условий натекания струи на преграду [1], исключение явлений демпфирования потока в месте гидродинамического удара [2], создание напряженного состояния в зоне резания [3] – все эти способы в большей или меньшей степени способствуют повышению производительности обработки. Последнее направление является наиболее перспективным [4], поскольку изменением напряженного состояния

материала можно значительно уменьшить его сопротивляемость разрушению от гидравлической струи или гидроабразивного потока.

Главная проблема гидрорезания заключается в том, что струя жидкости, обладая выборной способностью проникать в систему микротрещин и вызывать в последних значительные растягивающие напряжения, образует такую напряженную зону, в которой в центре гидровоздействия материал сжат, а на границе действия струи напряжения резко меняют свой знак на противоположный и становятся растягивающими. Именно в этой зоне и происходит зарождение начальных трещин. Однако их дальнейшее распространение может быть сложно прогнозируемым и происходит, как правило, в том числе и за зоной непосредственного натекания струи. Такой механизм разрушения практически полностью соответствует положениям теории Гриффитса для упругих тел [5], и объясняет формирование ряда дефектов формы, а также вероятность увода струи от первоначального направления. Вслед-

ствие этого рез формируется с достаточно широким дефектным слоем, а торец имеет разрывы и рытвины.

В то же время в ряде работ, в частности [6, 7], показано, что процесс трещинообразования напрямую зависит не только от приложенной нагрузки, но и от дефектов структуры материала, а также его напряженно-деформированного состояния.

Таким образом, можно предположить, что управлением напряженно-деформированного состояния зоны резания квазиупругих заготовок за счет устройств предварительного нагружения возможно не только повышение производительности обработки, но и повышение качества реза.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Существует ряд разработок повышения эффективности гидроабразивного резания путем создания растягивающих нагрузок в направлении, перпендикулярном движению рабочей подачи, приведенных, в частности, в [3]. 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. Автор [8] предлагает разделять рабочие движения на формообразующие и интенсифицирующие, но так как 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 возможность существенно повысить энергоэффективность гидрорезания листовых материалов.

В работе [9] показано, что изменение компоновки станка и применение инверсии движений (при которой рабочие перемещения совершает заготовка, а не струйная головка), существенно расширяет технологические возможности станка. При этом, на основании работы [10], значительно упрощаются и приемы контроля качества гидрорезки листовых материалов.

Если взять за основу идею перемещения заготовки по поверхности неподвижного стола с неподвижной струйной головкой, создание предварительного напряжения зоны резания за счет дополнительных нагрузочных приводов может быть легко реализуемо. При этом привода нагружают заготовку в нужном направлении лишь в пределах ее упругой деформации, будучи кинематически связанными, подобно системам [11], между собой и с приводом рабочих перемещений.

Рассмотрим напряженное состояние заготовки, расположенной на столе гидрорезного станка с компоновкой [9].

Известно, что при свободном опирании обрабатываемой заготовки в виде бесконечной пластины на жесткое горизонтальное основание натекание струи на неподвижную ($\varpi=0$), установленную под углом α относительно оси струи заготовку, вызывает реакцию [12]

$$P = \left[p_1 + \frac{\rho(v_0 \pm \varpi)^2}{2} \right] f_0 \sin \alpha = \rho Q_0 v_0 \sin \alpha, \tag{1}$$

где p_1 – давление истечения жидкости; ρ – ее плотность; v_0 – скорость истечения жидкости из сопла; Q_0 – расход через сопло.

Согласно [13], распределенная по поверхности контакта реакция обуславливает напряженное состояние поверхностного слоя, активизируя процесс трещинообразования до критического состояния, сопровождаемого отрывом микрочастиц.

Образовавшийся растекающийся поток жидкости вызывает вторичное гидродинамическое нагружение торцевых поверхностей фронта реза и ведет к зарождению новых трещин, а также к ветвлению уже существующих магистральных. Активное развитие процесса может сопровождаться образованием значительных кромочных дефектов (при $\sigma'' < [\sigma]$, где σ'' – напряжения, возникающие от действующего струйного нагружения) или поверхностным сколом [14].

Действие струи на выделенный микрообъем может быть описан следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_r = 2G \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\mu \epsilon}{1-2\mu} \right), \\ \sigma_t = 2G \cdot \left(\frac{u}{r} + \frac{\mu \epsilon}{1-2\mu} \right), \\ \sigma_z = 2G \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\mu \epsilon}{1-2\mu} \right), \\ \tau = G \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial r} \right), \end{cases} \tag{2}$$

где $\frac{\partial u}{\partial r} = \epsilon_r$ – радиальная деформация; $\frac{\partial H}{\partial z} = \epsilon_z$ – осевая деформация; $\frac{u}{r} = \epsilon_t$ – тангенциальная деформация.

При этом условия равновесия выделенного элемента будут следующими:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} = 0, \end{cases} \tag{3}$$

что позволяет дифференциальные уравнения перемещения в вертикальном и горизонтальном направлении U и H записать следующим образом:

$$\begin{cases} (1-2\mu) \cdot \left(\Delta U - \frac{U}{r^2} \right) + \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = 0, \\ (1-2\mu) \cdot \Delta H + \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad \Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{rdr} + \frac{d^2}{dz^2}. \tag{4}$$

С учетом (1) и того, что $p_0 = \mu v_0 \sqrt{2\rho p_b} \frac{f_c}{f_k}$, имеем:

$$U(t) = - \frac{(1-2\mu)p_0 \left[\frac{d_c}{2} \right]^2}{4G}, \quad 0 < \frac{D_i}{2} < \frac{d_c}{2}; \quad H(t) = - \frac{(1-2\mu)p_0 d_c}{2G}, \tag{5}$$

где G – модуль сдвига обрабатываемого материала; μ – его коэффициент Пуассона; ϵ – объемная деформация; d_c – диаметр среза сопла.

При действии растягивающих нагрузок R в зоне резания для случая симметричной постановки задачи значение U и H изменится:

$$U(t) = -U(t) = -\frac{(1-2\mu)\sqrt{\left(p_0\left[\frac{d_c}{2}\right]^2\right)^2 + \left(\frac{R}{2}\cos\beta\right)^2}}{4G}, \quad (6)$$

$$H(t) = -\frac{(1-2\mu)\sqrt{\left(p_0d_c\right)^2 + \left(\frac{R}{2}\cos\beta\right)^2}}{2G}. \quad (7)$$

Для площадки ds , расположенной под углом α_t относительно главных осей, напряжения определяются так:

$$\sigma_a = \sigma_n \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2) + \sigma_z \cdot \cos^2 \alpha_3, \quad (8)$$

$$\tau_a = \sqrt{\sigma_n^2 \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2) + \sigma_z^2 \cdot \cos^2 \alpha_3 - \sigma_a^2}, \quad (9)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы, образованные нормалью площадки с направлением действия силы приводов R и струи.

Полученные соотношения позволяют определить повышение производительности процесса гидрорезания без учета явлений трещинообразования, исходя из того, что объем съема материала определяется формулой [15]:

$$Q = 0,106 \cdot \left(\frac{P}{100}\right)^{2,4} \cdot d_c^{-0,27} \cdot h^{-0,35} \cdot \left(\frac{\sigma'}{100}\right)^{-0,75}, \quad (10)$$

где p – давление в г/с, МПа; d_c – диаметр струйной насадки, мм; h – толщина обрабатываемого материала, мм; σ' – запас прочности материала как разница $\sigma_p - \sigma_a$, где σ_a – напряжение, создаваемое дополнительным нагружением.

В то же время эти явления могут оказывать существенное влияние. Известно, что для квазихрупких материалов разрушение будет происходить за счет активного развития хрупких трещин, их слияния и формирования трещины магистральной, что, в конце концов, существенно снижает сопротивление разрушения образца.

Использовать такой эффект для повышения производительности гидрорезания сложно, поскольку рост трещин происходит практически неконтролируемо. Ведь при превышении критических значений нагрузок, то есть при возрастании скорости высвобождения энергии ($G-R$), будет происходить лавинообразное повышение кинетической энергии роста трещин с их активным ветвлением и слиянием. С другой стороны, незначительные нагрузки, не способные вызвать начало трещинообразования, интенсифицировать процесс не могут.

В то же время автор работы [16] отмечает, что скорость возрастания трещин может быть контролируема не только нагружением, но и его цикличностью

$$\frac{dl}{dN} \propto \frac{(\Delta\sigma\sqrt{l})^{2+\alpha\left(1-\frac{\beta}{2}\right)}}{\Delta\sigma^2}. \quad (11)$$

Таким образом, повышение производительности гидрорезания листовых заготовок при выполнении операций раскроя возможно за счет создания такого напряженного состояния в зоне резания, при котором явления трещинообразования сохраняли бы контролируемость, а возникающие напряжения вдоль оси z снижали бы сопротивление разрушению при натекании струйного потока.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследований – разработка принципов и технических решений, позволяющих повысить производительность процесса на основе управляемого трещинообразования.

Для достижения поставленной цели решали ряд задач, а именно:

- моделирование напряженно-деформированного состояния заготовки при различных видах предварительного нагружения;
- влияние различных форм и видов контура реза в предварительно нагруженных зонах на возникающие напряжения и возможности управляемого трещинообразования;
- оценка скорости распространения трещин и возможность ее контроля;
- разработка принципов и новых технических решений устройства для реализации процесса на действующем оборудовании, получение картин управляемого трещинообразования в исследуемых заготовках.

4. Материалы и методы исследований

4. 1. Исследуемые материалы и оборудование, используемые в эксперименте

Исследования проводились как средствами математического моделирования (с использованием пакетов Solid Works), так и реализацией ряда натуральных экспериментов с использованием гидрорезного станка ЛСК-400-5, оснащенного специальными приспособлениями, способными создавать управляемого многоцикловое нагружение рабочей зоны клещевыми схватами. В качестве исследуемых образцов применяли листы поликарбоната NOVATTRO толщиной 1,0–4,0 мм; акрил PLAZID толщиной 2,5–4,0 мм и листовой фольги АМг-2Н толщиной 0,1 мм.

Исследования развития трещин выполнялись на растровом электронном микроскопе «РЭМ-106И».

4. 2. Методика проведения исследований

Пусть исследуемая заготовка покоится на рабочем столе и консольно связана с механизмом ориентации и рабочих перемещений [3]. Если схваты выполнены парой и охватывают зону резания симметрично с двух сторон, то их перемещение вдоль кромки или поворот вокруг вертикальных осей будет вызывать соответствующее нагружение заготовки и ее деформацию.

Создание напряженного состояния в листовой заготовке возможно использованием:

- 1) приводов продольного перемещения вдоль ОХ (рис. 1), 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.

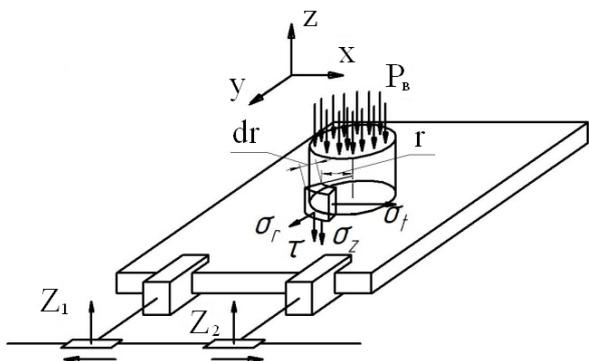


Рис. 1. Компонка гидрорезного станка с подвижной заготовкой и подвижной в вертикальной плоскости струйной головкой (неподвижной в плоскости XOY)

Предусматривается, что в местах захвата с пятном контакта $b \times h$ возможна установка вспомогательных приводов, обеспечивающих предварительное нагружение заготовки в зоне резания растягивающей силой, возникающей за счет линейного микро-перемещения вдоль оси OX, а также силами, возникающими за счет поворота вокруг вертикальной оси OZ, т. е. совершенного движения s_1 и s_2 .

Таким образом, возможны три варианта создания напряженного состояния в зоне резания (рис. 2): растяжение от продольного перемещения схватов (рис. 2, а), от поворота схватов вокруг оси z_1 и z_2 (рис. 2, б), а также от их одновременного действия (рис. 2, в), что дает возможность изменять форму эпюры нагружения, распределяется сжимающие и растягивающие напряжения в слое заготовки относительно начала координат XYZ.

Проведение модельных экспериментов потребовало создания расчетной модели специальных схватов для удержания и рабочего перемещения листовых заготовок размером $B \times L$ с установленными дополнительными приводами микроперемещений (рис. 3, а), что позволяет схему зоны резания представить в соответствии с рис. 3, б.

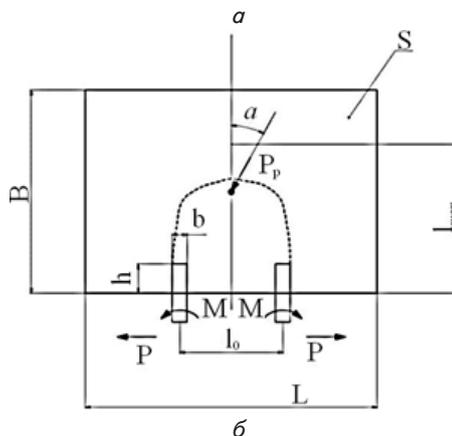
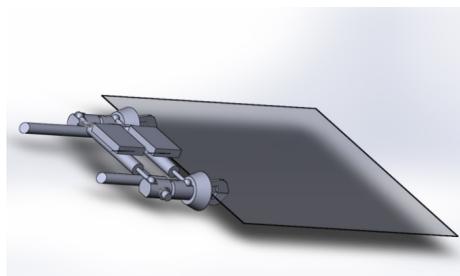


Рис. 3. Захват и удержание заготовки устройством предварительного нагружения: а – общий вид устройства; б – расчетная схема листовой заготовки с зоны предварительного нагружения

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

- внешние усилия, создаваемые приводом: сила P_p и момент M (которые приняты одинаковыми);
- нагрузка P_c и угол приложения нагрузки α струи жидкости;
- геометрические параметры захвата, расстояние между схватами l_0 ; ширина b и длина h зоны захвата.

Для оценки скорости удаления материала при условии создания дополнительного нагружения зоны резания воспользуемся эмпирической формулой (11).

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 $[\sigma_m]$, а максимальные усилия определяются трением контакта, т. е. $R_{max1} = 2\mu_p P_n$, $P_n < kbl \cdot [\sigma_m] k$ – коэффициент запаса, предотвращающий деформирование заготовки и ее повреждение в месте контакта.

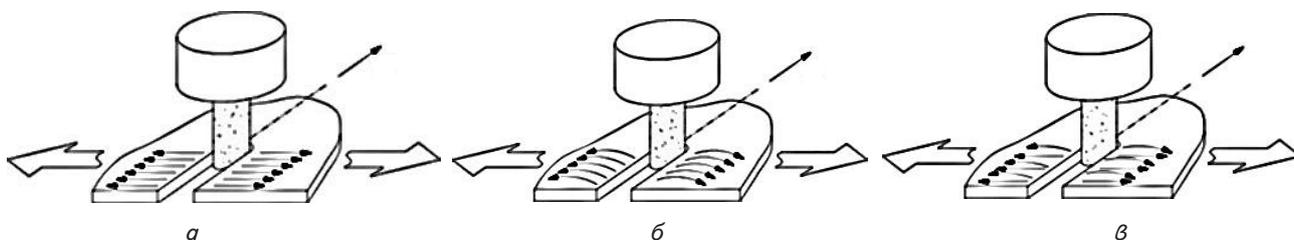


Рис. 2. Создание напряженного состояния заготовки в зоне резания: а – продольное нагружение; б – нагружение поворотом вокруг оси OZ; в – совместного действия силы и момента

Другим ограничением была величина нагрузки $R_{max2} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{4L^2}$, при которой листовая заготовка могла потерять устойчивость с последующим ее короблением. Тут L – расстояние между схватами; J_{min} – минимальный момент инерции, для данного случая J_x .

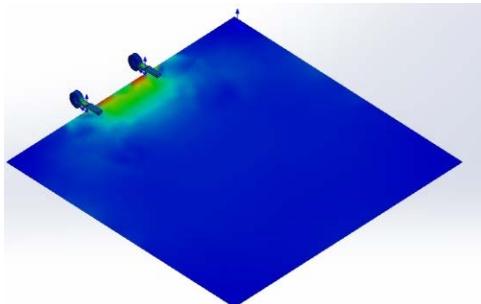


Рис. 4. Примеры расчета статических узловых напряжений на модели листовой заготовки, воспринимающей нагружения от механотронного привода микроперемещений

При оценке влияния трещинообразования на производительность гидрорезания исходили из следующего. Из линейной механики разрушения известно, что интенсивность напряжений связана с длиной трещины следующей зависимостью [5]:

$$k = \sigma\sqrt{\pi a}, \tag{12}$$

где k – коэффициент интенсивности напряжений; s – действующее напряжение; a – половина длины трещины (рис. 1).

Коэффициент интенсивности напряжений обуславливает скорость высвобождения энергии, которая связана с ним следующим соотношением:

$$G = \frac{1-v^2}{E} A(V)k^2, \tag{13}$$

где v – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости первого рода материала, МПа.

Напряжения в зоне резания вызываются потоком жидкости вдоль оси z и создаваемым предварительным нагружением кромки листового материала. Таким образом, можно ожидать, что в результате действия нагрузок перемещения материала в зоне резания H и U определяться (6) и (7), а напряжения на площадках фронта разрушения – уравнениями (8) и (9).

С другой стороны, скорость роста трещины зависит от возникающих изгибающих нагрузок и пропорциональна $\sqrt{\omega\eta}$, где h – кинематическая плотность жидкости, w – частота ударов частиц струи по поверхности. Распирающее действие молекул жидкости способствует активному расклиниванию трещин, и, как следствие, ведет к переходу избытка высвобожденной энергии ($G-R$) в кинетическую энергию движения точек по обе стороны от траектории распространения трещины. Эти процессы зависят от компактности струи и практически не контролируемые.

В то же время, скорость роста трещин непосредственно влияющих на производительность процесса, будет определяться (11), а, следовательно, требуемым уровнем $\Delta\sigma$, создаваемым приводами предварительного нагружения.

Пусть при резании контур обработки располагается перпендикулярно линии реза (рис. 5).

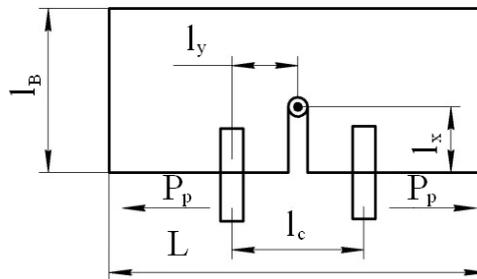


Рис. 5. Пластина с начальным разрезом, нагруженная продольной силой

Для отыскания соответствующих напряжений и деформаций в такой постановке задача сводится к рассматриваемой в работе [17]. Если представить, что схема нагрузки листовой заготовки будет соответствовать (табл. 1), а сама пластина имеет размеры $L \times l_B$ и растягивается в точках z_1 и $z_2 = z_1$ сосредоточенными силами P_p перпендикулярно линии краевой трещины L_1 , которая непосредственно связана их базисной системой координат xOy и расположена на отрезке $|x| \leq l$ линии симметрии пластины (оси Ox), причем начальный разрез соответствует берегам трещины L_1 , а границы пластины L_0 , отнесенные к центральной локальной систем координат $x_0O_0y_0$, свободны от напряжений, то граничные условия на контурах L_1 и L_0 примут вид:

$$N(t_0) + iT(t_0) = 0, \quad t_0 \in L_0; \tag{14}$$

$$N^\pm(t_1) + iT^\pm(t_1) = 0, \quad t_1 \in L_1 = [-l, l]. \tag{15}$$

Тогда интегральное уравнение, описывающее состояние пластины, будет представлено в виде

$$\int_{-1}^1 [M(\xi, \eta)\psi_0(\xi) + N(\xi, \eta)\overline{\psi_0(\xi)}] d\xi = \pi p_0^0(\eta), \quad |\eta| \leq l; \tag{16}$$

$$M(\xi, \eta) = K(\omega(\xi), \omega(\eta));$$

$$N(\xi, \eta) = L(\omega(\xi), \omega(\eta)); \quad p_0^0(\eta) = p_0^0(\omega(\eta))$$

при условии, что

$$t_0 = \omega(\xi), \quad t_0' = \omega(\eta) \quad |\xi, \eta| \leq 1, \quad \omega(\pm 1) = -\alpha.$$

Согласно [5] существует несколько моделей восприятия пластиной с трещиной нагрузки, для которых КИН определено аналитически. Это дает возможность уравнение (11) представить в следующем виде:

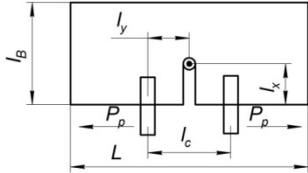
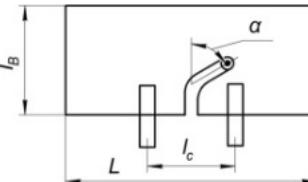
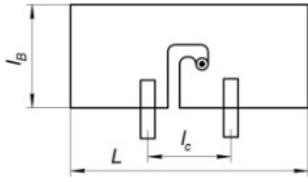
$$\frac{dl}{dN} \propto \frac{K^{[2+\alpha(1-\frac{\beta}{2})]}}{\Delta\sigma^2\sqrt{\pi}}. \tag{17}$$

Тогда, зная КИН, можно определить условия появления и роста трещин в зоне резания, а также вероятную скорость, с которой трещины будут распространяться в материале.

Так, для случаев, представляющих интерес для данной задачи (продольное растяжение (силой P_p) или проворачивание (моментом M) при прямолинейном или контурном резании) коэффициенты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Принятое значение КИН для различных схем нагружения

Расчетная схема	КИН	
	Воздействие силы P_p	Воздействие момента M
	$K_I = \frac{\sigma\sqrt{l}}{2\sqrt{\pi}} \left[\arcsin \frac{c}{l} - \arcsin \frac{c}{l} \right] + \frac{\tau(c-b)}{2\sqrt{\pi l}} \times \frac{\eta-1}{\eta+1}$ $K_{II} = \frac{\sigma(c-b)}{2\sqrt{\pi l}} \cdot \frac{\eta-1}{\eta+1} + \frac{\tau\sqrt{l}}{2\sqrt{\pi}} \left[\arcsin \frac{c}{l} - \arcsin \frac{c}{l} \right]$	$K_I = \frac{3}{4}\sigma\sqrt{\pi l},$ $K_{II} = \frac{3}{4}\sigma\sqrt{\pi l}$
	$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi R \sin \alpha}}{2(1 + \sin^2 \frac{\alpha}{2})} \left[\begin{aligned} &\cos \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \left(2\beta + \frac{5}{2}\alpha \right) - \\ &-\cos \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^4 \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \alpha \times \\ &\times \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \end{aligned} \right]$ $K_{II} = \frac{\sigma\sqrt{\pi R \sin \alpha}}{2(1 + \sin^2 \frac{\alpha}{2})} \left[\begin{aligned} &\sin \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin \left(2\beta + \frac{5}{2}\alpha \right) + \\ &+\sin \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^4 \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \alpha \times \\ &\times \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \end{aligned} \right]$	$K_I = \frac{3}{4}\sigma\sqrt{\pi l},$ $K_{II} = \frac{3}{4}\sigma\sqrt{\pi l}$
	$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi R \sin \alpha}}{2(1 + \sin^2 \frac{\alpha}{2})} \left[\begin{aligned} &\cos \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \left(2\beta + \frac{5}{2}\alpha \right) - \\ &-\cos \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^4 \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \alpha \times \\ &\times \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \end{aligned} \right]$ $K_{II} = \frac{\sigma\sqrt{\pi R \sin \alpha}}{2(1 + \sin^2 \frac{\alpha}{2})} \left[\begin{aligned} &\sin \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin \left(2\beta + \frac{5}{2}\alpha \right) + \\ &+\sin \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^4 \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \alpha \times \\ &\times \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \left(2\beta + \frac{3}{2}\alpha \right) \end{aligned} \right]$	$K_I = \frac{3}{4}\sigma\sqrt{\pi l},$ $K_{II} = \frac{3}{4}\sigma\sqrt{\pi l}$

Появление в зоне резания начального надреза от действия струи (сходного с начальной трещиной) требует уточнения значений КИН, обусловленных видом, величиной и положением надреза в пластине.

Воздействие момента к схватам изменяет картину и вызывает появление напряжений только в некотором удалении от оси схватов, больших по своей величине на 20–40 % (рис. 6, б).

5. Результаты исследований трещинообразования в квазиупругих материалах

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

Установлено, что работа привода линейного нагружения схватов вызывает растягивающие напряжения в слое заготовки с осесимметричной спадающей эпюрой, перпендикулярной оси привода (рис. 6, а). Прило-

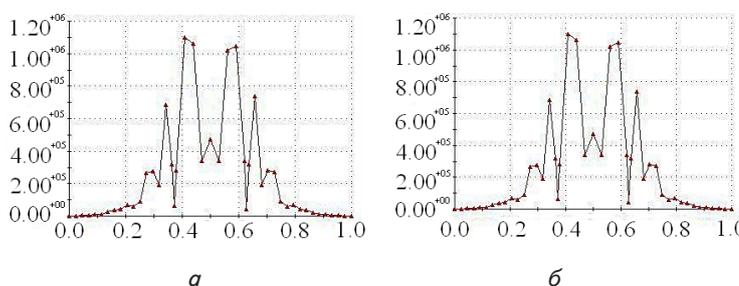


Рис. 6. Эпюры статических узловых напряжений, полученных при моделировании нагружения заготовки: а – линейное микроперемещением схватов; б – поворотное микроперемещением схватов

При этом напряженное состояние, при котором возможно активное трещинообразование, достигается только в непосредственной близости от точки захвата (параметрическое расстояние 0,07–0,09) что для листа шириной 500 мм ограничивается 50–100 мм от торца схватов (рис. 7). Размеры схватов, условия контакта и расположение схватов относительно торца оказывают незначительное влияние на возникающие напряжения и характер их распределения.

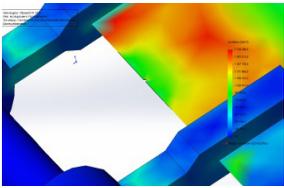
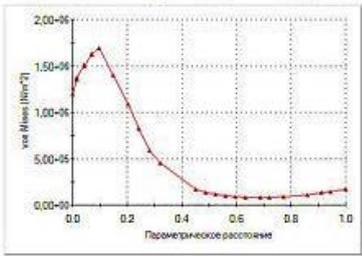
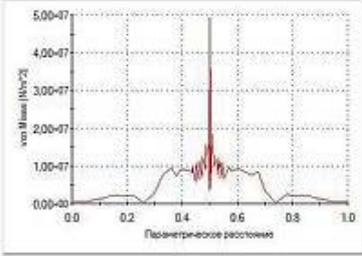
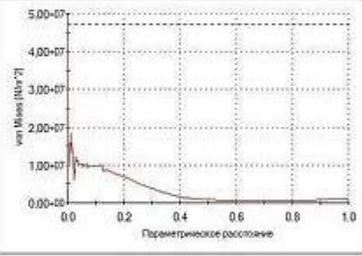
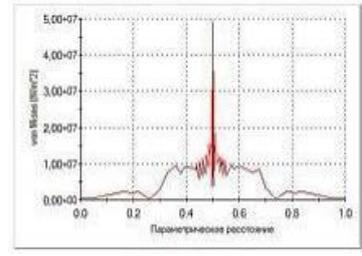
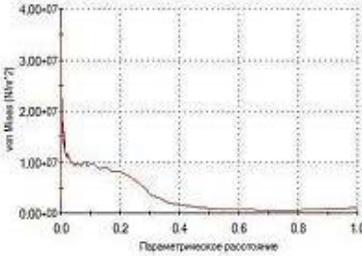
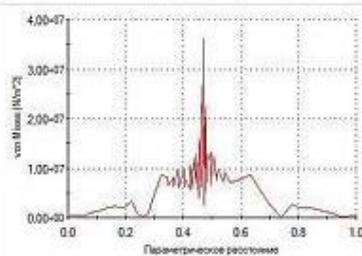
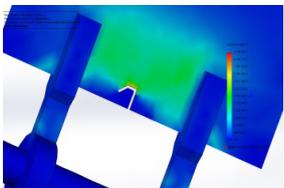
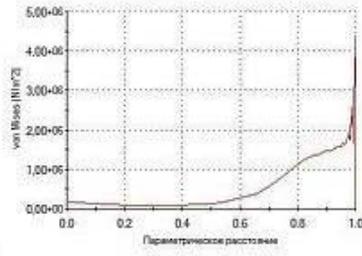
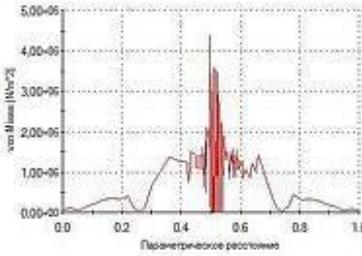
Проверку условия роста трещин и оценку влияния трещинообразования на производительность гидрорезки осуществляли следующим образом. Заготовку нагружали циклическими растягивающими и поворотными нагрузками (пример приведен в табл. 2 – силой P_p и моментом M). С использованием пакета SolidWorks определяли напряженно-деформированное состояние зоны обработки, что позволило рассчитать напряжения σ , входящие в (17).

При выполнении условия $(G-R)>0$ трещина начнет развиваться, что дает возможность, зная частоту приложения нагрузки, установить приращение длины трещины dI для каждого последующего цикла. Таким образом, с учетом длительности периода цикла нагружения, определена скорость роста трещины в теле заготовки.

Далее проводили натурные эксперименты, нагружая исследуемые образцы циклической периодической силой, максимальное значение которой определялось условием допустимого деформирования заготовки (отсутствием потери устойчивости), а минимальное составило 0,1–0,25 максимального. Частота нагружения – 50...250 Гц. Значение сил и моментов для образца из фольгированного поликарбоната NOVATTRO, а также микроэлектронные фотографии форм и видов трещин, приведены в табл. 3.

Таблица 2

Напряжения в зоне резания, рассчитанные на основе моделирования различных типов начальных резов

Распределение напряжения в зоне резания	График напряжений	
	Продольное сечение	Поперечное сечение
		
		
		
		

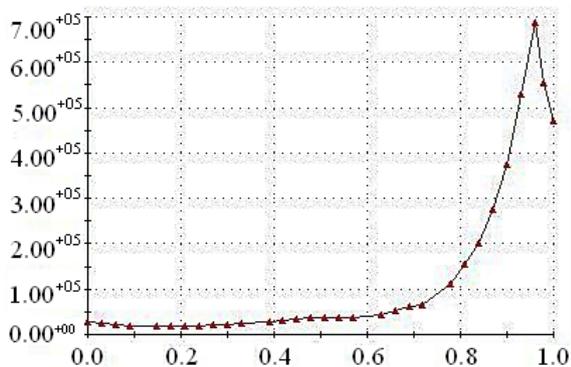


Рис. 7. Изменение величины растягивающих напряжений вдоль **OY** по оси симметрии привода (по горизонтали показано относительное расстояние, начало координат у правого края)

Применение фольгированного материала позволило без существенных изменений физико-механических свойств материала получить токопроводящую поверхность, дающую возможность использовать растровую электронную микроскопию для фиксации картин трещинообразования.

6. Обсуждение результатов использования управляемого трещинообразования для повышения производительности гидроабразивного раскроя квазиупругих листовых заготовок

Экспериментальные исследования позволили установить следующее. Создание в плоскости материала циклических напряжений в пределах 40–60 МПа с частотой 50–250 Гц обеспечивает рост трещин со скоростями (рис. 8), не ведущими к появлению значи-

Таблица 3

Микрофотографии образцов из фольгированного поликарбоната NOVATTRO (толщина материала = 1,2 мм, толщина фольги – 25 мкм)

Воздействие растягивающей силы на образец и длина трещины	Амплитуда и частота нагружения раст. усилием	Воздействие крутящего момента на образец и длина трещины	Амплитуда и частота нагружения раст. усилием
 $I_{тр}=450 \text{ мкм}$	$P_{max}=120 \text{ Н},$ $P_{min}=12 \text{ Н},$ 50 Гц	 $I_{тр}=620 \text{ мкм}$	$M_{max}=8,0 \text{ Нм},$ $M_{min}=1,0 \text{ Нм},$ 50 Гц
 $I_{тр}=380 \text{ мкм}$	$P_{max}=90 \text{ Н},$ $P_{min}=15 \text{ Н},$ 50 Гц	 $I_{тр}=730 \text{ мкм}$	$M_{max}=4,0 \text{ Нм},$ $M_{min}=0,5 \text{ Нм},$ 250 Гц
 $I_{тр}=560 \text{ мкм}$	$P_{max}=120 \text{ Н},$ $P_{min}=20 \text{ Н},$ 250 Гц	 $I_{тр}=810 \text{ мкм}$	$M_{max}=10,0 \text{ Нм},$ $M_{min}=1,0 \text{ Нм},$ 50 Гц
 $I_{тр}=330 \text{ мкм}$	$P_{max}=90 \text{ Н},$ $P_{min}=15 \text{ Н},$ 250 Гц	 $I_{тр}=410 \text{ мкм}$	$M_{max}=4,0 \text{ Нм},$ $M_{min}=0,5 \text{ Нм},$ 250 Гц

тельных сколов на краях обработки. При этом такие напряжения в пластинках толщиной до 1,5–3,0 мм не приводят к существенным деформациям, следовательно, погрешность формы готовых изделий за счет деформаций исходной заготовки будет оставаться минимальными, что весьма важно в практическом аспекте. Сетка начальных трещин в момент начала резки от торца с перпендикулярным входом струи составляет ветви длиной 0,05–0,35 мм, распространяющиеся в пределах углов $\pm\pi/6$. При этом повышение частота прилагаемой нагрузки ведет к большему ветвлению трещин и уменьшению их длины, что в целом соответствует положениям теории Гриффитса.

Сравнение расчетных величин скорости распространения трещины и результатов микроэлектронного анализа показывает, что коэффициенты интенсивности напряжений, определяемые по уравнениям табл. 1, адекватны лишь для случая начального распространения трещины и нагружения зоны резания растягивающим усилием. При нагружении моментом результаты имеют существенное отличие, которое можно пояснить отличием напряженно-деформированного состояния зоны резания в заготовке от идеальных условий.

Изменение длины начального разреза ведет к росту напряжений при неизменной нагрузке и к прогрессирующему росту скорости образования трещин.

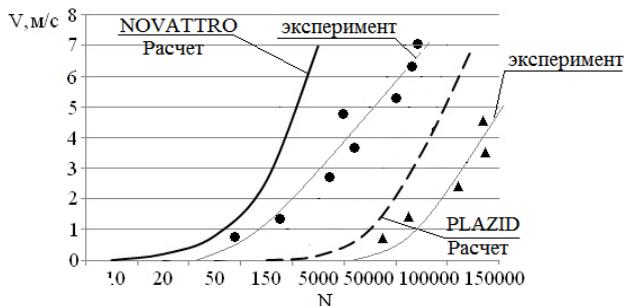


Рис. 8. Рост скорости развития трещин при приложении гармонической нагрузки к зоне струйного резания

Таким образом, с увеличением длины реза нагрузка зоны резания должна снижаться для предотвращения неконтролируемого возрастания скорости трещинообразования.

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 расстояние $L=130$ мм процесс гидрорезания протекает, как и в обычных условия (рис. 9, а).

При этом угол наклона касательной к траектории движения α также оказывает существенное влияние на повышение объемного съема материала Q (рис. 9, б). Из результатов расчета очевидно, что максимальное значение угла α при обработке не должно превышать значений $\pm\pi/4$, что позволяет построить диаграмму эффективных направлений обхода контура (рис. 10), для которых повышение производительности при резании будет иметь место.

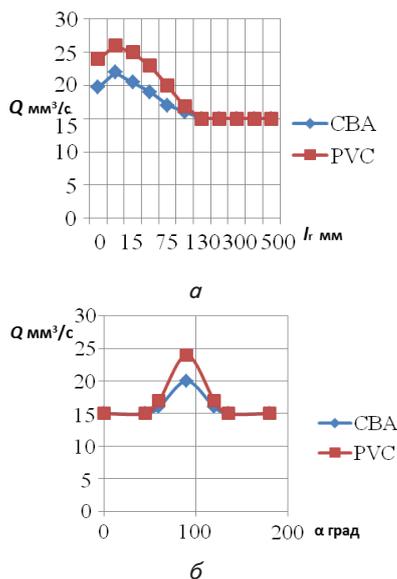


Рис. 9. Изменение производительности процесса, выраженное через объемный сьем материала при гидрорезании: а – в зависимости от расстояния от кромки схватов, б – угла между касательной к контуру реза и осью симметрии рабочего органа

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 механотронного 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 P), так и для привода поворотного перемещения (создающего момент M), рис. 10. 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.

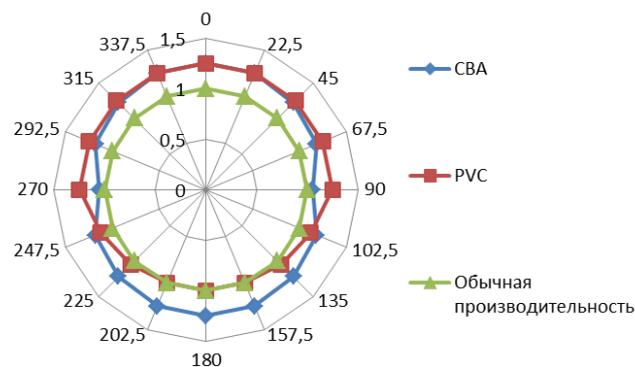


Рис. 10. Диаграмма эффективных направлений обхода контура

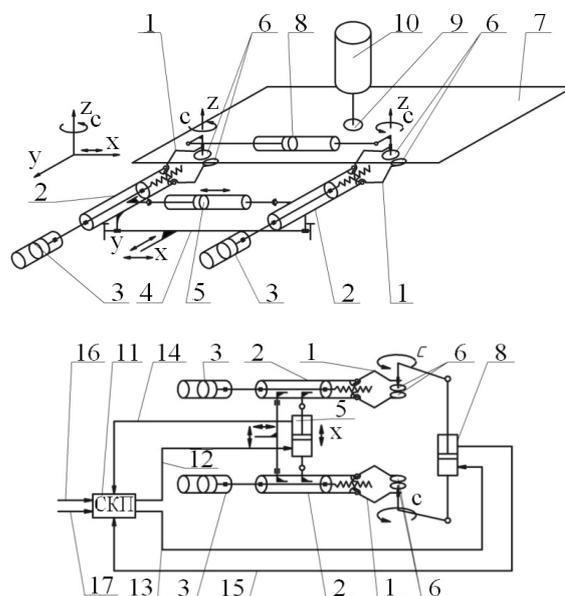


Рис. 11. Механотронное устройство для создания контролируемого напряженного состояния зоны обработки

Само механотронное устройство может иметь следующее техническое решение.

Устройство состоит из пары симметрично расположенных зажимных губок 1 (рис. 11, а), кинематически соединенных путем механизма сведения губок

и передаточного механизма 2 с реверсивным приводом 3, смонтированных с возможностью продольного перемещения в направлении, близком к перпендикуляру касательной контура резки на направляющей выходного звена манипулятора 4. Между собой пары губок 1 шарнирно соединены приводом продольного перемещения 5. Каждая из губок дополнительно оснащена вставками 6 в виде контактирующих с поверхностью листовой заготовки 7 прижимов. Последние установлены с возможностью вращения вокруг вертикальной оси каждой из губок 1 и шарнирно соединены между собой приводом 8, который поворачивает вставки (например, за счет жестко закрепленных односторонних рычагов, шарнирно контактируют с приводом линейных перемещений 8). При этом работа приводов 5 и 8 согласуется с перемещением выходного звена манипулятора 4, и определяется прочностными характеристиками заготовки, а также точкой приложения струйного нагрузки 9 от струи 10, которая должна находиться между токами контакта вставок 6. Приводы 5 и 8 соединены с системой управления 11 с помощью линий 12 и 13 обеспечения усилий на парах губок 1. Информация о перемещениях и, соответственно, деформациях обрабатываемой заготовки 7 (рис. 11, а) поступает в систему управления 11 (рис. 11, б) путем обратных связей по координате 14 и 15 соответственно для каждого привода. Дополнительно к системе управления 11 шиной 16 поступает информация о свойстве обрабатываемой заготовки, а шиной 17 – по направлению движения струйной головки 10 (рис. 11, а). Устройство работает следующим образом. После подведения манипулятором 4 губок 1 до кромки листовой заготовки 7 подается команда на ущемление, и с помощью реверсивных приводов 3 путем передаточного механизма 2 губки 1 смыкаются на заготовке, вызывая сдвиг вставок 6 до их контакта с заготовкой 7. При этом информация о свойствах и геометрических параметрах обрабатываемой заготовки 1 поступает шиной 16 до устройства управления 11, а информация о траектории движения – шиной 17. В точках зажима вследствие действия сил R возникнут контактные деформации, способные вызвать силу трения F_t , $F_t = mR$, где m – коэффициент трения, которая обеспечивает перемещение заготовки относительно оси струи. При этом в зависимости от положения точки действия струйного нагрузки 9 и направления раскроя заготовки 7 приводы 5 и 8 получают сигналы от системы управления 11 линиями 12 и 13 (рис. 11, б). Далее они начинают нагружать пары губок 1 и вставки 6 продольной P и вспомогательной (поворотной)

F_k нагрузками так, что $P < F_t$, $F_k L < M_t$, где L – длина рычага вставки, M_t – момент трения в точке контакта, определяется силой зажима, в частности, $M_t = R d_p$, где d_p – приведенный диаметр вставки, определяемый конструкцией. Вследствие упругого деформирования заготовки в ней могут возникнуть растягивающие напряжения, достигающие своего максимума на торце закрепления с уменьшением при удалении от этого торца, и контролируются с деформацией заготовки 1 линиями обратной связи 14 и 15 которые соединены с системой управления 11. Распределения напряжений в плоскости заготовки, и, следовательно, повышение производительности гидрорезания определяется уменьшением сопротивления гидроразрушения R в определенном направлении за счет созданных нагрузками приводов 5 и 8 напряжений σ_n в зоне резания. Это позволяет повысить производительность гидрорезания в $\left(\frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma}\right)^{0,75}$ раз, где σ – предел прочности материала при растяжении, МПа.

Структурная схема гидрорезного оборудования, оснащенного схватами с механотронными приводами микроперемещений показана на рис. 12. За основу взято техническое решение гидрорезного станка с ЧПУ, представленное в [8]. Введение двух дополнительных приводов (линейного нагружения заготовки усилием P_p и нагружения моментом M_v схватов) предполагает также установления обратной связи ОС₃ для определения направления движения и введения дополнительной линии коррекции скорости рабочей подачи K_d , сигнал от которой подается на элемент суммирования. Кроме того, привод Π_1 является ведущим, а привод Π_2 – ведомым, что предполагает согласование их работы элементами через соответствующие связи.

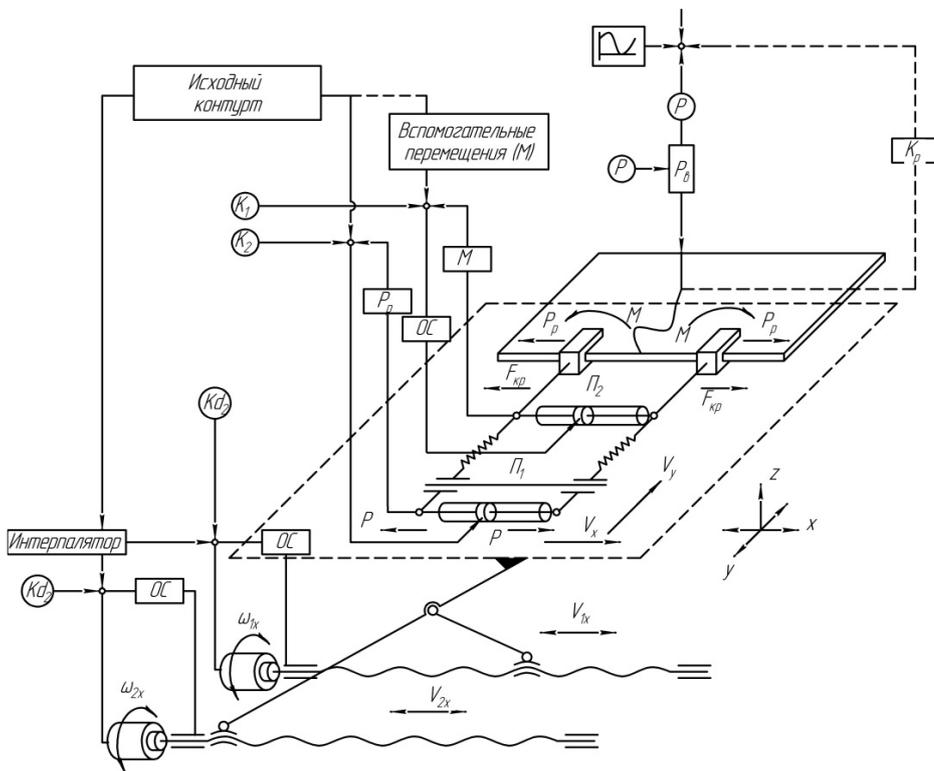


Рис. 12. Структурная схема предлагаемого технического решения

Таким образом, полученная интегрированная система интенсификации гидрорезания позволяет при задействовании приводов предварительного нагружения заготовки увеличить производительность обработки квазиупругих листовых материалов (в частности, поликарбоната NOVATTRO толщиной 1,0–4,0 мм; акрила PLAZID толщиной 2,5–4,0 мм) небольшой толщины на 15–25 %, за счет более полного использования мощности основной гидростанции станка.

В дальнейшем необходимы дополнительные исследования предлагаемой системы на достижимую точность, поскольку резание с интенсификацией процесса за счет явлений управляемого трещинообразования предполагает деформацию заготовки.

7. Выводы

1. В результате моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки при различных видах предварительного нагружения установлено, что напряжения в зоне резания могут создаваться линейным нагружением схватов для случая, когда зона резания находится в непосредственной близости к торцу захвата, и моментами, когда зона удаляется от торца на расстояние, превышающее размер пятна контакта со схватом. При этом силовое нагружение ограничивается устойчивостью заготовки, а также условиями возникновения сил трения в местах контакта со схватами. Нагрузка должна осуществляться так, чтобы возникающие напряжения не превышали 40–60 МПа, а частота определяется условиями гидрорезания.

2. Формы и виды контура реза оказывают существенное влияние на снижение сопротивления разрушению исследуемых материалов. Так, отклонение реза от перпендикулярного направления ведет к существенному снижению эффекта управляемого тре-

щинообразования, которое полностью исчезает для случая резания в направлении, близком к направлению действия силы предварительного нагружения. 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.

3. Показано, что квазигармоническое нагружение зоны струйной резки при гидрорезания листовых упругих заготовок малой толщины интенсифицирует появление микротрещин в малых объемах с ограниченной скоростью их развития, позволяет ожидать повышения производительности струйного реза за счет существенного падения сопротивления разрушений материала. Оценка скорости распространения трещин и возможность ее контроля, создание в плоскости материала циклических знакопеременных напряжений в пределах 40–60 МПа с частотой 200–1500 Гц обеспечивает рост трещин со скоростями 0,75–2,5 м/с, не ведущими к появлению значительных сколов на кромках обработки; при этом такие напряжения в пластинках толщиной до 1,5–3,0 мм не создают существенных деформаций и не ведут к появлению погрешностей формы, что важно в практическом аспекте.

4. Для создания соответствующего напряженного состояния зоны обработки целесообразно применение механотронного привода, способного обеспечить управляемость нагрузкой зоны струйной эрозии и препятствовать появлению значительных деформаций листовой квазиупругой заготовки.

Литература

1. Miller, R. Waterjet Cutting: Technology and Industrial Applications [Text] / R. Miller. – Fairmont Press, 1991. – 154 p.
2. Бреннер, В. А. Гидроструйные технологии в промышленности. Гидроабразивное резание горных пород [Текст] / В. А. Бреннер, А. Б. Жабин, А. Е. Пушкарев, М. М. Щеголевский. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. – 279 с.
3. Рыкунов, А. Н. Повышение эффективности гидроабразивной обработки на основе моделирования процессов микроразрушения материалов [Текст]: справочник / А. Н. Рыкунов, Я. Ю. Яблуновский // Инженерный журнал. – 2009. – № 4 приложение. – С. 14–17.
4. Orel, V. N. Using of mechanotronics devices for working movements workpieces during waterjet cutting [Text] / V. N. Orel, V. T. Shchetinina, O. V. Fomovska, A. F. Salenko // Journal of the Technical University of Gabrovo. – 2015. – Vol. 52. – P. 35–42.
5. Матвиенко, Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения [Текст] / Ю. Г. Матвиенко. – Москва: ФИЗМАЛИТ, 2006. – 328 с.
6. Лебедев, А. А. Несущая способность пластины с трещиной при двухосном растяжении [Текст] / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка // Проблемы прочности. – 2001. – № 2. – С. 20–27.
7. Яблуновский, Я. Ю. Гидроабразивное резание материалов [Текст] / Я. Ю. Яблуновский // Естественные и технические науки. – 2007. – № 5. – С. 182–183.
8. Степанов, Ю. С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок [Текст] / Ю. С. Степанов, Г. В. Барсуков, Е. Г. Алюшин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 6. – С. 15–20.
9. Антоненко, О. В. Структурно-параметричний синтез гідрорізного верстата із системою контролю зони струминної ерозії [Текст]: сб. науч. тр. / О. В. Антоненко // Прогресивні технології і системи машиностроєння. – Донецьк. – 2007. – № 47. – С. 144–156.

10. Agus, M. Abrasive performance in rock cutting with AWJ and ASJ [Text] / M. Agus, A. Bortolussi // Proc. 8-th American Water Jet Conference, 1995. – P. 31–48
11. Ламм, Т. В. Повышение точности деталей из листа при гибке-формовке эластичной средой [Текст] / Т. В. Ламм, Е. И. Исаченков. – Технические проблемы производства ЛА и двигателей. – Казань, 1998. – С. 20–29.
12. David, A. Waterjetting Technology [Text] / A. David, D. Summers. – Printed in Great Britain by the Alden Press, Oxford, 1995. – 882 p.
13. Саленко, А. Ф. Повышение точности контурного гидроабразивного резания пластин из твердых сплавов и сверхтвердых материалов [Текст] / А. Ф. Саленко, В. Т. Щетинин, А. Н. Федотьев. – 2014. – Т. 3, № 36. – С. 73–84. doi: 10.3103/s1063457614030083
14. Саленко, А. Ф. Качество обработки материалов гидроабразивной струей [Текст] / А. Ф. Саленко, А. В. Фомовская // Оборудование и инструмент. – 2009. – № 1. – С. 16–19.
15. Тихомиров, Р. А. Гидрорезание неметаллических материалов [Текст] / Р. А. Тихомиров, В. С. Гуенко. – Киев: Техника, 1984. – 150 с.
16. Сви́рский, Ю. О методе расчета скорости распространения трещины при нестационарном повреждении [Текст] / Ю. Сви́рский // Ученые записки ЦАГИ. – 1976. – Т. VII, № 4. – С. 81–96.

В статті загальна структура виробничого процесу ремонту представляється як система, що складається з ряду елементів, які мають різний вплив на результуючу подію, – відмову вузла в експлуатації після ремонту. Застосування інструментів алгебри логіки дозволило визначити структурну значимість елементів системи, що характеризує ступінь впливу технологічних процесів ремонту на справність вузлів тягового рухомого складу

Ключові слова: технологічний процес, ремонт, вузол, тяговий рухомий склад, вплив, елемент, відмова, система, справність, оцінка

В статье общая структура производственного процесса ремонта представляется как система, состоящая из ряда элементов, которые имеют различное влияние на результирующее событие, – отказ узла в эксплуатации после ремонта. Применение инструментов алгебры логики позволило определить структурную значимость элементов системы, которая характеризует степень влияния технологических процессов ремонта на исправность узлов тягового подвижного состава

Ключевые слова: технологический процесс, ремонт, узел, тяговой подвижной состав, влияние, элемент, отказ, система, исправность, оценка

УДК:629.4.027

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59878

ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЮ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РЕМОНТУ НА СПРАВНІСТЬ ВУЗЛІВ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Ю. М. Дацун

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра експлуатації та
ремонтів рухомого складуУкраїнський державний університет
залізничного транспорту

пл. Феєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61000

E-mail: remlocomot@gmail.com

1. Вступ

Реструктуризація залізничного комплексу України вимагає вирішення ряду складних правових, організаційних та технічних питань. Трансформація галузі повинна відповідати вимогам часу та носити оптимізаційний характер. Локомотивне господарство в цей час поряд із забезпеченням перевізної роботи залізниць та утриманням локомотивів постає перед питаннями розробки, виробництва та впровадження нових серій тягового рухомого складу (ТРС), модернізації та відновлювального ремонту існуючого парку ТРС, впровадження нових форм взаємодії між суб'єктами – учас-

никами перевізного процесу, розробка та застосування нових видів та методів утримання і сервісу ТРС [1].

Важливим питанням в таких умовах є необхідність об'єктивної оцінки технічного рівня локомотиворемонтних виробництв, як основного критерію при визначенні базових підприємств для організації сервісу ТРС різних серій.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Перші методи оцінки діяльності підприємств виникли в західній економіці в 20-ті роки минулого