

УДК 621:30.050

НАВАНТАЖЕННЯ ЗОНИ СТРУМИННОЇ ЕРОЗІЇ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЛИСТОВОГО ГІДРОСТРУМИННОГО РОЗКРОЮ

В. М. Орел

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: deoxis@inbox.ru

Розглянуто процес струминного різання квазікрихких матеріалів з позицій лінійної механіки руйнування, що дає змогу пов'язати розвиток тріщиноутворення із енергетичними показниками процесу різання та параметрами якості утворених поверхонь. Показано, що при зростанні швидкості вивільнення енергії відбуватиметься лавиноподібне вивільнення кінетичної енергії росту тріщин з їх активним розвитком, унаслідок чого процес втрачає керованість. Керування нестационарним напруженим станом дозволяє обмежити швидкість зростання тріщини. Доведено, що при обробці матеріалів, які виявляють квазікрихкі властивості, прикладання навантаження суттєво змінює продуктивність процесу, оскільки не тільки підвищує напруженість зони струминного впливу і знижує опір руйнуванню, а і веде до появи сітки крихких тріщин, на яких обробка відбуватиметься значно продуктивніше.

Ключові слова: контурне різання; напружений стан.

НАГРУЗКА ЗОНЫ СТРУЙНОЙ ЭРОЗИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛИСТОВОГО ГИДРОСТРУЙНОГО РАСКРОЯ

В. Н. Орел

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: deoxis@inbox.ru

Рассмотрен процесс струйной резки квазихрупких материалов с позиций линейной механики разрушения, что позволяет связать развитие трещинообразования с энергетическими показателями процесса резки и параметрами качества образованных поверхностей. Показано, что при росте скорости высвобождения энергии будет происходить лавинообразное высвобождение кинетической энергии роста трещин с их активным развитием, вследствие чего процесс теряет управляемость. Управление нестационарным напряженным состоянием позволяет ограничить скорость роста трещины. Доказано, что при обработке материалов, которые проявляют квазихрупкие свойства, приложение нагрузки существенно меняет производительность процесса, поскольку не только повышает напряженность зоны струйного воздействия и снижает сопротивление разрушению, а и ведет к появлению сетки хрупких трещин, на которых обработка происходит продуктивнее.

Ключевые слова: контурная резка; напряженное состояние.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Фізична основа процесу гідрорізання при розкрюванні листової заготовки, внаслідок якого формується готовий виріб, полягає в руйнуванні певних обсягів матеріалу, що знаходяться між виробом та частиною-відходом. При цьому відомо [1–2], що руйнування матеріалу з утворенням прорізу є наслідком процесів стиснення, розтягування, ерозії, розтріскування, зсуву, розповсюдження хвиль, кавітаційного пошкодження та зносу, котрі протікають у тілі та викликаються гідродинамічними локальними навантаженнями перепони – оброблюваної поверхні від дії струменя.

Вважається, що струмінь рідини, володіючи виборною спроможністю проникати в систему мікротріщин і викликати в останніх значні розтяжні напруження, утворює таку напружену зону, в якій у центрі гідровпливу (рис. 1) матеріал стиснуто, а на межі дії струменя при $r=r_c$ напруження різко змінюють свій знак на протилежний і стають розтягуючими. Надання поступової подачі елементам технологічної системи призводить до перенесення гідровпливу на сусідню ділянку, і, відповідно, до зміни на ній знаку напружень, в результаті чого на межі $r=r_c$ з'являються початкові мікротріщини, які в подальшому активно поширюються вглиб тіла у напрямку, перпендикулярному межовій площині $z=0$.

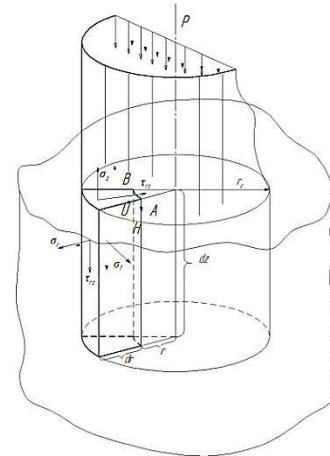


Рисунок 1 – Напружений стан зони струминного різання

На основі результатів, висвітлених у [3], можна вважати, що мікротріщини є наслідком процесів зсуву на межі пластичної та пружної зон, де при струменевому навантаженні діють значні розтягуючі напруги. Зароджуючись на початкових локальних дефектах оброблюваного тіла, мікротріщини розвиваються, зливаються, створюючи кавітаційну тріщину, яка веде до відокремлення частини оброблюваного тіла.

Метою роботи було визначити зростання продуктивності та оцінити можливість керування напруженим станом зони гідроструминного різання засобами попереднього навантаження листової заготовки.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В роботах [4–5] показано, що процес струминного різання квазікрихких матеріалів можна розглядати з позицій лінійної механіки руйнування, що дає змогу пов'язати розвиток тріщиноутворення із енергетичними показниками процесу різання та параметрами якості утворених поверхонь. При цьому виниклі, але нерозвинені тріщини формують поверхневий деструктивний шар. Оскільки відомо, що теорія Гріфитса для пружних тіл, до яких можна віднести неметалеві полімерні композити, реактопласти та термопласти, характеризує стабільну міцність за всіма напрямками, можна очікувати відхилення напрямку зростання тріщини від початкового напрямку при $K_{II} \neq 0$ (зсуву) на певний кут $\chi = -\chi_c$, співпадаючий з напрямком максимального значення збурюючої сили P , обумовлюючої розвиток тріщини. Для випадку різання матеріалів різальним клином розвитку тріщини відповідатиме рис. 2. Прикладене зовнішнє зусилля, при якому спостерігатиметься активне тріщиноутворення, повинно перевищувати опір розтріскуванню.

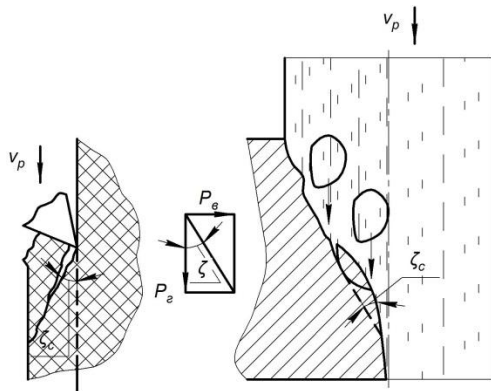


Рисунок 2 – Стружкоутворення, як наслідок розвитку тріщини в матеріалі

Внаслідок недосконалості реальних матеріалів, повний опір розтріскуванню буде залежати від різних типів тріщиноутворення (виникнення зсувних тріщин або тріщин відриву). Якщо прийняти до уваги, що напрям росту тріщини завжди сприяє її розкриттю, задача оцінки ймовірного напрямку розвитку тріщини при гідроструменевому навантаженні зводиться до встановлення очікуваної епюри тиску на фронті руйнування, який безпосередньо визначатиметься миттєвим положенням елементарних площинок поверхні поділу та епюрою напружень зони різання від прикладених інтенсифікуючих сил до самої оброблюваної заготовки. Саме про можливість підвищення продуктивності поздовжнього різання листових заготовок зазначав автор [6], однак напружений стан зони різання він пропонував створювати обертовими та встановленими під певним кутом елементами.

Такий спосіб є задовільним для випадку різання матеріалів по лінії, перпендикулярній симетрично встановленим обертовим елементам, однак він не передбачає можливості виконання контурної обробки. У той же час більшість операцій розкрою вимагає різання за довільним контуром, а низький коефі-

цієнт корисної дії процесу робить дослідження особливо актуальним.

При вільному опиранні оброблюваної заготовки у вигляді нескінченної пластини на жорстку горизонтальну поверхню натікання струменя на нерухому ($\varpi=0$), встановленого під кутом α відносно осі струменя перепону, якою є елементарна площинка руйнування у зоні різання, викликає реакцію [7]

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

де p_1 – тиск витікання рідини; ρ – густина рідини; v_0 – швидкість витікання рідини з сопла; Q_0 – витрата рідини.

Розподілена по поверхні контакту, реакція обумовлює напружений стан поверхневого шару, активізуючи процес тріщиноутворення до критичного стану, який супроводжується відривом мікрочастинок.

Утворений розтічний потік викликає вторинне гідродинамічне навантаження торцевих поверхонь борозенки різи та тріщин, які знову зародилися або стали наслідком розгалуження іншої магістральної тріщини на цих поверхнях. Активний розвиток останніх може супроводжуватися розшаруванням матеріалу (при $\sigma'' < [\sigma]$ на значній глибині залягання тріщини) або поверхневим зколом [5].

Таким чином, процес тріщиноутворення в кінцевому рахунку обумовлює орієнтацію елементарних площинок руйнування та безпосередньо з ним пов'язаний. Постійна зміна геометрії зони гідроруйнування, обумовлена переорієнтацією, зникненням та появою нових елементарних площинок поверхні розділу, викликає відповідні зміни напруженого стану зони різання, що дозволяє вважати процес гідрорізання неметалевих матеріалів нестационарним.

Порівняння швидкості росту тріщини v , яка визначається відповідно до [7] як

$$v = 0.3 \sqrt{\frac{E}{2\rho_m(1+\nu)}}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ_m – густина оброблюваного матеріалу і може сягати 705 м/с, з квазістатичною швидкістю заглиблення струменя у тіло оброблюваного матеріалу, що обумовлюється рядом факторів, зокрема,

$$v_c = \frac{(p - \sigma_m k) r_c^2 v_c}{\sigma_m k r^2}, \quad (3)$$

де σ_m – межа міцності оброблюваного матеріалу; r_c – радіус струменя; v_c – швидкість витікання струменя з соплової насадки, доводить, що швидкість розповсюдження фронту деструкції, яка є наслідком тріщиноутворення, буде випереджати швидкість проникнення струменя у тіло заготовки у 12-30 разів.

В роботі [8] автором показано, що існує певна критична швидкість росту тріщини, після якої тріщина починає розгалужуватися. Причому збільшення критичного навантаження викликає деяке зростання критичної швидкості розповсюдження тріщини, однак одночасно скорочує шлях до початку її розгалуження. Тут же зроблено висновок про

існування критичної швидкості розповсюдження тріщин в наповненому неметалевому матеріалі (армованому композиті), яка не залежить від підведеної енергії. Це явище обумовлюється поглинанням та накопиченням мікрodefектів, яке буде відбуватися в напрямку $\chi=60^{\circ}$, де існують максимальні розтягуючі напруги. Розгалудження та вторинне розгалудження слід очікувати під кутом 20° відносно напрямку магістральної тріщини. Важливим є той факт, що довжина тріщини до розгалудження залежить від зовнішнього навантаження і зменшується при зростанні навантаження.

Періодичне зародження, розвиток та злиття тріщин веде до відокремлення частинок матеріалу, обумовлює циклічність характеру процесу обробки, при якому гідродинамічні сили спочатку підвищуються до максимальних значень (при зародженні сітки тріщин), а потім стрімко знижується (поява магістральної тріщини та відокремлення частинки шламу). Оскільки гідрорізання є процесом впливу сукупності певної кількості мікроскопічних ріжучих клинів, які в цілому виконують роботу руйнування на зароджених та розвинутих тріщинах, такі коливання викликають широкочастотні хвильові явища в оброблюваному тілі.

З лінійної механіки руйнування відомо, що інтенсивність напружень пов'язана з довжиною тріщини наступною залежністю [8]:

$$k = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

де k – коефіцієнт інтенсивності напруг; σ – діючі напруження; a – половина довжини тріщини (рис. 3).

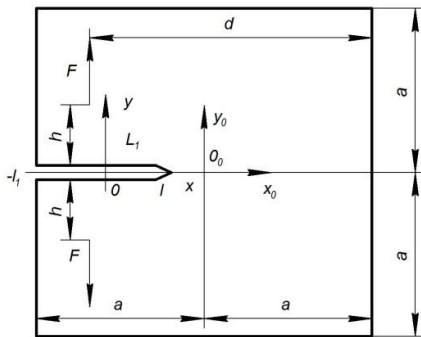


Рисунок 3 – Утворена тріщина і її розвиток

Коефіцієнт інтенсивності напружень обумовлює швидкість вивільнення енергії, яка пов'язана з ним таким співвідношенням:

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} A(V)k^2 \quad (5)$$

де ν – коефіцієнт Пуассону, E – модуль пружності першого роду матеріалу, МПа.

Напруження можуть утворюватися як від дії швидкоплинного потоку (уздовж осі z , так і від створеного попереднього навантаження крайки листового матеріалу. Оскільки відомо, що швидкість зростання тріщини при вигинаючих осьових навантаженнях у випадку впливу швидко рухомих частинок рідини на мікроступи поверхні, що контактує із периферією швидкоплинного струменя

пропорційна $\sqrt{\omega \eta}$, де η – кінематична густина рідини, ω – частота коливань навантаження, можна очікувати, що розклинююча дія молекул рідини сприятиме активному розклинюванню тріщин, і, як наслідок, вестиме до переходу надлишку вивільненої енергії ($G-R$) в кінетичну енергію руху точок по обидві сторони від траєкторії розповсюдження тріщини. Таким чином, чим більша різниця ($G-R$), тим швидше збільшує свій розмір тріщина.

Отже, у зоні струминного впливу напруження у рівнянні (4) визначатимуться, виходячи з наступного. В мікробсягах заготовки у точці натікання струменя напруження для площадки ds , розташованої під кутом α_i відносно головних вісей, згідно із [9] становитимуть:

$$\sigma_a = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3 \cdot \cos^2 \alpha_3, \quad (6)$$

$$\tau_a = \sqrt{\sigma_1^2 \cdot \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2^2 \cdot \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3^2 \cdot \cos^2 \alpha_3 - \sigma_a^2}, \quad (7)$$

тобто для вертикального розташування вісі Oz та умови симетричності навантаження тонкої пластини-заготовки клинчастими тримачами матимемо:

$$\sigma_a = \sigma_n \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2) + \sigma_3 \cdot \cos^2 \alpha_3, \quad (8)$$

$$\tau_a = \sqrt{\sigma_n^2 \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2) + \sigma_3^2 \cdot \cos^2 \alpha_3 - \sigma_a^2}, \quad (9)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – кути, утворені нормаллю площадки із напрямком дії сил навантаження R та струменя струї; σ_1, σ_2 – напруження, обумовлені дією сили попереднього навантаження.

Напруження від дії швидкоплинного струменя, сфокусованого на площинках руйнування f_p від дії струменя (1), становитимуть

$$\sigma_n = \frac{\rho Q_0 v_0}{f_p} = \frac{\rho Q_0 v_0}{\pi \int_0^h f(x) \sqrt{1+f'^2(x)} dx}, \quad (10)$$

де $f(z)$ – крива, що описує фронт борозенки різа відносно осі натікання струменя, який розташований вертикально, у першому наближенні $z = ax^2$ за умови, що у (10) h – товщина оброблюваної заготовки.

Отже, при обробці пластичних матеріалів і таких, що не виявляють крихкі властивості, зростання продуктивності гідрорізання можливе перед усім за рахунок зменшення опору руйнування матеріалу, тобто в рівнянні

$$Q = 0,106 \cdot \left(\frac{P}{100}\right)^{2,4} \cdot d_c^{-0,27} \cdot h^{-0,35} \cdot \left(\frac{\sigma'}{100}\right)^{-0,75}, \quad (11)$$

де p – тиск у г/с, МПа; d_c – діаметр струминної насадки, мм; h – товщина оброблюваного матеріалу, мм; σ' – міцність матеріалу - являтиме різницю $\sigma_p - \sigma_a$, де σ_a напруження, обумовлені додатковим навантаженням.

Для квазікрихких та крихких матеріалів руйнування відбуватиметься за рахунок зростання крихких тріщин, які стрімко розвиваються, що веде до виникнення зон передруйнування та втрати опору руйнування самою листовою заготовкою.

На практиці це може призвести до випереджаючого зростання тріщини уздовж лінії напрямку дії

сили гідродинамічного навантаження та, за умови створення напруженого стану в зоні різання, перпендикулярно до лінії дії сили R .

Тоді для відшукування відповідних напружень і деформацій в такій постановці задача зводиться до розглянутій у роботі [10]. Якщо уявити, що схема навантаження листової заготовки буде відповідати рис. 4, а сама пластина має розміри $2a$ і розтягується в точках z_1 і $z_2=z_1$ зосередженими силами F перпендикулярно до лінії крайової тріщини L_1 , яка безпосередньо пов'язана їх базисною системою координат xOy та розташована на відрізку $|x| \leq 1$ лінії симетрії пластини (вісі Ox), причому початковий розріз відповідає берегам тріщини L_1 , а границі пластини L_0 , віднесені до центральної локальної системи координат $x_0O_0y_0$, які вільні від напружень, то граничні умови на контурах L_1 та L_0 мають вигляд:

$$N(t_0) + iT(t_0) = 0, \quad t_0 \in L_0; \quad (12)$$

$$N^\pm(t_1) + iT^\pm(t_1) = 0, \quad t_1 \in L_1 = [-l, l] \quad (13)$$

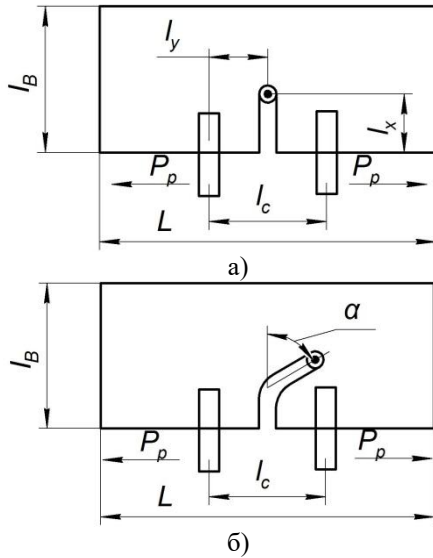


Рисунок – 4. Пластина із початковим розрізом, навантажена поздовжньою силою із симетричним (а) або несиметричним (б) навантаженням

А саме інтегральне рівняння матиме вигляд

$$\int_{-1}^1 [M(\xi, \eta) \psi_0(\xi) + N(\xi, \eta) \overline{\psi_0(\xi)}] d\xi = \pi p_0^0(\eta), \quad |\eta| \leq 1; \quad (14)$$

$$M(\xi, \eta) = K(\omega(\xi), \omega(\eta)); \quad N(\xi, \eta) = L(\omega(\xi), \omega(\eta)); \quad p_0^0(\eta) = p_0^0(\omega(\eta)) \quad (15)$$

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

Згідно із [9] застосування до інтегрального рівняння квадратурних формул Гауса – Чебишова отримано систему $N^* - 1$ алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{k=1}^{N^*} [M(\xi_k, \eta_m) u_0(\xi_k) + N(\xi_k, \eta_m) \overline{u_0(\xi_k)}] = N_* p_0^0(\eta_m), \quad m = 1, \overline{N_* - 1} \quad (16)$$

для визначення N^* невідомих величин $u_0(\xi_k)$, в яких вузли ξ_k та η_m визначаються рівністю

$$\xi_k = \cos \left[\frac{(2k-1)\pi}{2N_*} \right]; \quad \eta_m = \cos \left[\frac{m\pi}{N_*} \right] \quad (17)$$

Тоді для випадку симетричної відносно вісі Ox пластини та симетрично прикладеного навантаження система рівнянь становитиме

$$\sum_{k=1}^{N_*} \left\{ \begin{matrix} M(\xi_k, \eta_m) + \\ + N(-\xi_k, \eta_m) \end{matrix} \right\} v_0(\xi_k) + \left\{ \begin{matrix} N(\xi_k, \eta_m) + \\ + M(-\xi_k, \eta_m) \end{matrix} \right\} \overline{u_0(\xi_k)} = [M(\xi_{N^*+1}, \eta_m)] u_0(\xi_{N^*+1}) = \quad (18)$$

$$= N_* p_0^0(\eta_m) \\ m = 1, \overline{N^*}$$

$$\sum_{k=1}^{N_*} (-1)^{k+1} \left[\begin{matrix} u_0(\xi_k) \operatorname{tg} \frac{2k-1}{4N_*} \pi + \\ + u_0(\xi_k) \operatorname{ctg} \frac{2k-1}{4N_*} \pi \end{matrix} \right] + (-1)^{N^*} u_0(\xi_{N^*+1}) = 0. \quad (19)$$

А відшукування змінних полягає у розв'язку повної системи комплексних алгебраїчних рівнянь (18), (19) порядку N^*+1 .

Поява у зоні різання початкового надрізу від дії струменя (як пошкодження, схожого із початковою тріщиною) вимагає уточнення значення коефіцієнту інтенсивності напружень (4), обумовлених видом, величиною та положенням тріщини в пластині.

Згідно з [11] існує кілька моделей сприйняття пластиною із тріщиною навантаження, для яких КІН визначено аналітично. Так, для випадків, які є цікавими із точки зору даної задачі (поздовжнє розтягування або крутний момент на поверхні для випадку прямолінійного різання, а також контурне різання для зазначених схем навантаження) відповідні коефіцієнти становлять:

- поздовжнє розтягування стиснутими кліщатами
-

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{l}}{2\sqrt{\pi}} \left[\frac{\arcsin \frac{c}{l} - \arcsin \frac{c}{l}}{-\sqrt{1-\frac{c^2}{l^2}} + \sqrt{1-\frac{b^2}{l^2}}} \right] + \frac{\tau(c-b)}{2\sqrt{\pi l}} \times \quad (20)$$

$$\times \frac{\eta-1}{\eta+1},$$

$$K_{II} = \frac{\sigma(c-b)}{2\sqrt{\pi l}} \cdot \frac{\eta-1}{\eta+1} + \frac{\tau \sqrt{l}}{2\sqrt{\pi}} \left[\frac{\arcsin \frac{c}{l} - \arcsin \frac{c}{l}}{-\sqrt{1-\frac{c^2}{l^2}} + \sqrt{1-\frac{b^2}{l^2}}} \right], \quad (21)$$

- прикладання поворотного моменту до кліщат

$$K_I = \frac{3}{4} \sigma \sqrt{\pi l}, \quad K_{II} = \frac{3}{4} \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (22)$$

- криволінійна тріщина із навантаженням розтяжним зусиллям

$$K_I = \frac{3}{4} \sigma \sqrt{\pi l}, \quad K_{II} = \frac{3}{4} \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (23)$$

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi R} \sin \alpha}{2 \left(1 + \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right)} \left[\cos \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \left(2\beta + \frac{5}{2} \alpha\right) - \cos \left(2\beta + \frac{3}{2} \alpha\right) \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^4 \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \alpha \right] \times \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin \left(2\beta + \frac{3}{2} \alpha\right) \quad (24)$$

$$K_{II} = \frac{\sigma \sqrt{\pi R} \sin \alpha}{2 \left(1 + \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right)} \left[\sin \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\alpha}{2} \sin \left(2\beta + \frac{5}{2} \alpha\right) + \sin \left(2\beta + \frac{3}{2} \alpha\right) \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^4 \frac{\alpha}{2} \right) - \sin \alpha \right] \times \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \left(2\beta + \frac{3}{2} \alpha\right) \quad (25)$$

Для площини як пластини безкінечного розміру відповідно матимемо:

$$K_I = 1,12 \sigma \sqrt{\pi l} \quad (26)$$

$$K_{II} = 0,68 \sigma \sqrt{\pi l} \quad (27)$$

$$K_I = \sqrt{\pi} \frac{4\pi - 12}{\pi^2 - 8} \cdot \frac{P_{cc}}{\sqrt{c}} + \sqrt{\pi} \frac{4\pi - 12}{\pi^2 - 8} \cdot \frac{M_{cc}}{c \sqrt{c}} \quad (28)$$

Таким чином, при перевищенні критичних значень навантажень, тобто при зростанні швидкості вивільнення енергії ($G-R$) відбуватиметься лавиноподібне вивільнення кінетичної енергії росту тріщин з їхнім активним розвитком, однак процес втратить керованість. З іншого боку, незначні навантаження, які неспроможні викликати початок тріщиноутворення, інтенсифікувати процес не зможуть.

Однак якщо навантаження створювати циклічно, то на підставі роботи [12] швидкість зростання тріщин становитиме

$$\frac{dl}{dN} \propto \frac{(\Delta \sigma \sqrt{l})^{2+\alpha \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)}}{\Delta \sigma^2} \quad (29)$$

або після підстановки коефіцієнта інтенсивності напружень:

$$\frac{dl}{dN} \propto \frac{K \left[2+\alpha \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)\right]}{\Delta \sigma^2 \sqrt{\pi}} \quad (30)$$

де K визначається за (20-28).

Таким чином, керування нестационарним напруженим станом (забезпечуючи, наприклад, квазігармонійне навантаження заготовки) дозволяє обмежити швидкість зростання тріщини до межі, перевищення якої може призвести до втрати керованості процесу струминного різання. Стає очевидним, що при обробці матеріалів, які виявляють квазікрихкі властивості, прикладання навантаження суттєво змінює продуктивність процесу, оскільки не тільки підвищує напруженість зони струминного впливу і знижує опір руйнуванню, а і веде до появи сітки крихких тріщин, на яких обробка відбуватиметься значно продуктивніше.

Так, перевірка зростання швидкості розвитку тріщин у листових заготовках (зокрема, склопластику СВА, оргскла та вуглепластику АФ-ЗТ) показала (рис. 5), що створення в площині матеріалу циклічних знакозмінних напружень в межах 40–60 МПа із частотою 200-1500 Гц забезпечує зростання тріщин зі швидкостями, що не призведуть до появи значних сколів на крайках обробки; при цьому такі напруження в пласт-

тинках товщиною до 1,5–3,0 мм не створюватимуть істотних деформацій та не вестимуть до появи похибок форми, що важливо в практичному аспекті. Отже, враховуючи, що мережа початкових тріщин в момент початку різання від торця (рис. 4, б) становить 0,05–0,3 мм, зростання відповідних коефіцієнтів напружень (за рівняннями 20–28) та величини dl/dz (30) за відповідні цикли навантажень відбуватиметься з прискоренням (до 0,25 мм/с²); при прорізанні матеріалу у за фронтовій зоні напруження спадатимуть до мінімальних значень.

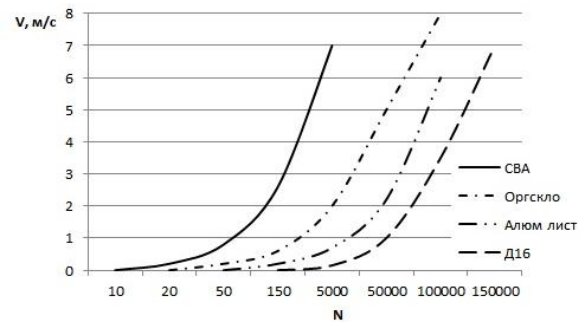


Рисунок 5 – Зростання швидкості розвитку тріщин при накладанні квазігармонійного навантаження на зону струминного різання

Це потребує узгодження параметрів динамічного навантаження зони струминного різання зі швидкістю подачі та підтримання такого режиму навантаження, при якому значного розвитку тріщин не спостерігається. Враховуючи, що при гідрорізанні на верстаті заготовки мають кінцеві розміри, порівняні із крайками, обробленими за технологічний перехід, навантаження зони різання має бути обумовленим скоригованим за умови, що падіння опору руйнуванню матеріалу не повинне викликати лавиноподібне зростання напружень σ_a і відповідного зростання значень КІН. Таким вимогам задовольняє механотронний привод попереднього навантаження зони струминного різання.

ВИСНОВКИ. Таким чином, показано, що нестационарне (гармонійне) навантаження зони струминного різання при гідрорізанні листових квазікрихких заготовок малої товщини інтенсифікує появу мікротріщин у малих обсягах з обмеженою швидкістю їх розвитку, що дозволяє очікувати підвищення продуктивності струминного різання за рахунок істотного падіння опору руйнування матеріалу.

Навантаження має здійснюватися так, щоб виникаючі напруження не перевищували 40–60 МПа, а частота обумовлюється умовами гідрорізання.

Для створення відповідного напруженого стану зони обробки доцільне застосування механотронного приводу, спроможного забезпечити керованість навантаженням зони струминної ерозії та передувати появі значних деформувань заготовки при різанні заготовок кінцевих розмірів.

ЛИТЕРАТУРА

- David A., Summers D. Waterjetting Technology. Printed in Great Britain by the Alden Press. – Oxford, USA. – 1995. – 882 p.

2. Тихомиров Р.А., Гуенко В.С. Гидроэрозия неметаллических материалов. – Киев: Техника, 1984. – 160 с.

3. Петко И.В., Кедровский В.Г. Моделирование процессов резания неметаллических материалов гидроструей высокого давления // Известия вузов «Технология легкой промышленности». – №4. – 1987. – С. 127–131.

4. Саленко О.Ф., Струтинский В.Б., Загірняк М.В. Эффективные гидрорезания. – Кременчук: вид-во КрНУ, 2008. – 488 с.

5. Сосновский Л.А. Механика износоусталостного повреждения. – Гомель, 2007. – 290 с.

6. Орел В.Н., Щетинин В.Т., Саленко А.Ф. Повышение производительности листовых заготовок при использовании механотронных систем предварительного нагружения // Вісник КрНУ. – Кременчук: КрНУ. – Вип. 5(94)/2015. – С. 118–123.

7. Зайченко И.З. Применение высоконапорной струи жидкости для резания материалов // Станки и инструмент – 1988. – № 4. – С. 25–28.

8. Ионов В.Н., Селиванов В.В. Динамика разрушения деформируемого тела. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

9. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984. – 520 с.

10. Лебедев А.А., Музыка Н.Р. Несущая способность пластины с трещиной при двухосном растяжении // Проблемы прочности, 2001, № 2. – С. 20–27.

11. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацышин А.П. Распределение напряжений около трещины в пластинах и оболочках. – Киев: Наукова думка, 1976. – 442 с.

12. Свирский Ю.А. О методе расчета скорости распространения трещины при нестационарном повреждении // Ученые записки ЦАГИ, том VII, 1976. –

№ 4. – С. 81–96.

THE LOAD ZONE OF JET EROSION AS A MEAN OF IMPROVING THE PERFORMANCE OF WATER-JET CUTTING SHEET

V. Orel

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

Purpose. To determine the growth performance and to evaluate the possibility of control of the tension state of the zone water-jet cutting means pre-loading the blanks. **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.** Thus, it is shown that non-stationary load zone of the jet of cutting at quasi brittle sheet blanks of small thickness intensifies the appearance of microcracks in small volumes that allows to expect the improvement of the performance of jet cutting due to the significant fall of destruction of the material. **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 mechanotronics microdisplacement drives, which allows to present the cutting zone scheme in accordance with. **Practical value.** To create the appropriate stress condition of the treatment area it is advisable to use mechanotronic devices "actuator" capable to provide control of the load zone of the jet erosion and to precede the appearance of significant damages of the work piece during the cutting of work pieces of finite size. References 12, figures 15.

Key words: contour cutting, strain stressed state.

REFERENCES

1. David, A., Summers, D. (1995), *Water jetting Technology*, Alden Press, Oxford, Great Britain.

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

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

4. Salenko, O.F., Strutynskiy, V.B., Zagirnyak, M.V. (2008), *Efektivne gidrorizannya* [Effective water jet cutting], KrNU publishing house, Kremenchug, Ukraine.

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

6. Orel, V.N., Shchetinin, V.T., Salenko, O.F., (2015), "Improving performance waterjet cutting of blanks when using the mechatronic systems preloaded", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 5(94), pp. 118–123.

7. Zaychenko, I.Z. (1988), "The use of high-pressure liquid jet for cutting materials", *Stanki i instrument*, no.4, pp. 25–28.

8. Ionov, V.N., Selivanov, V.V. (1987), *Dinamika razrusheniya deformiruyemogo tela* [The dynamics of destruction deformable solid], Mashinostroyeniye, Moscow, Russia.

9. Belotserkovskiy, O.M. (1984), *Chislennoye modelirovaniye sploshnykh sred* [Numerical modeling incontinuum mechanics], Nauka, Moscow, Russia.

10. Lebedev, A.A., Muzyka, N.R. (2001), "The bearing capacity of the plate with a crack under biaxial tension", *Problemy prochnosti*, no.2, pp. 20–27.

11. Panasyuk, V.V., Savruk, M.P., Datsyshyn, A.P. (1976), *Raspredelenie napryazheniy okolo treshchiny v plastinakh i obolochkakh* [The stress distribution around the crack in plates and shells], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

12. Svirskiy, O. (1976), "About the method of calculating the speed of crack propagation in unsteady damage", *Uchenye zapiski CAGI*, vol.VII, no.4, pp. 81–96.

Стаття надійшла 07.12.2015.