

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ РАСКРОЕ ВОДОЛЕДЯНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Ю.С. Степанов, А.Н. Качанов, М.А. Бурнашов

*В статье математически доказывается повышение эффективности технологии раскроя водоледяной струей по сравнению с обычным гидрорезанием настиллов материалов. Определяется величина деформации материала в зоне резания.*

*In article the increase of efficiency of technology of cutting by a water-ice jet in comparison with cutting by a water jet of floorings of materials is proved. The size of deformation of a material in a cutting zone is defined.*

В последние годы в машиностроении и других отраслях широкое распространение получил способ раскроя листовых материалов высоконапорной жидкостной и абразивно-жидкостной струей. В работах [1, 2] и многих других указывается на очевидное превосходство технологии гидроабразивной резки над гидрорезанием таких твердых материалов, как конструкционные (в том числе и труднообрабатываемые жаропрочные и коррозийноустойчивые) стали и сплавы, мрамор, гранит, высокопрочные полимерные материалы и т.д. Также даются рекомендации для гидрорезания менее прочных материалов: бумаги, картона, резины, текстильных материалов и композиций на их основе, искусственной кожи и различных пластиков. В ряде случаев, и чаще всего технология гидрорезания вышеуказанных материалов уступает по производительности и себестоимости обработки таким традиционным способам раскроя, как резание ленточным и вертикальным ножом, вырубанию, катковому и ротационному способам. Однако для повышения эффективности гидрорезания неметаллических рулонных материалов не представляется возможным (с точки зрения качества и точности раскроя) применение гидроабразивной резки ввиду специфики физико-химического их состава и строения. Вместо ровной кромки реза возникают местные «разлохмаченные» разрывы обрабатываемого полотна из-за ударного воздействия абразивных зерен. Решение проблемы повышения эффективности раскроя листовых и рулонных материалов (ЛРМ) высоконапорной струей жидкости (ВСЖ) является актуальной задачей для современного машиностроения.

Одним из способов повышения эффективности раскроя ЛРМ ВСЖ является обработка не водной, а водоледяной струей. При-

менение местного замораживания ВСЖ при выходе из сопла позволяет воздействовать на обрабатываемый материал не только за счет создаваемых напряжений растяжения – сжатия (как происходит при гидрорезании), а также за счет образовавшихся льдинок на периферии ВСЖ «добавлять» эрозионную составляющую в процесс разрушения. За счет воздействия льдинок увеличивается рост микротрещин на обрабатываемых полотнах, причем в направлении подачи режущего инструмента, – ВСЖ.

Как было отмечено выше, наилучшее качество реза ЛРМ наблюдается при раскрое вертикальным или ленточным ножом. Однако автоматизированный раскрой плотных, прорезиненных материалов, настилаемых на раскройных столах, практически невозможен из-за значительных сил резания и затупления режущего инструмента. В настоящее время раскрой таких материалов ведется только с ручной подачей режущего инструмента (или с подачей полотна на раскройно-ленточных машинах).

В настоящей работе дано теоретическое объяснение причин повышения эффективности резания ВСЖ в случае замораживания струи. Качество реза ЛРМ водоледяной струей приближается к качеству раскроя вертикальным и ленточным ножом при «не изнашиваемом» режущем инструменте, позволяющим создавать любую сложную линию кроя, что невозможно механическим способом. Ширина реза при раскрое ВСЖ – до 0,001 м.

Не вникая в конкретные механизмы разрушения материала при резании, в работе используется предположение, что разрушение материала наступает в случае, когда упругая деформация в точке разреза превышает некоторый заданный уровень. Процесс реза-

ния считается тем эффективнее, чем скорее достигается этот уровень. Используем абстрактную динамическую модель развития деформации в точке разреза в форме линейного дифференциального уравнения второго порядка

$$y'' + 2\alpha y' + (\alpha^2 + \omega^2)y = x, \quad (1)$$

где  $y$  – деформация,  $x$  – напряжение,  $\alpha$  – приведенный коэффициент демпфирования,  $\omega$  – собственная частота,  $\alpha^2 + \omega^2$  – коэффициент упругой силы.

Можно трактовать уравнение (1) как уравнение динамики точки единичной массы, на которую, помимо внешнего воздействия  $x$  действуют упругая сила с коэффициентом упругости  $\alpha^2 + \omega^2$  и сила трения с коэффициентом трения  $2\alpha$ . Такой способ задания параметров модели используется исходя из желания представить выражение для решения уравнения в компактном виде. С этой же целью будем использовать специальный временной масштаб: за единицу времени взята расчётная продолжительность процесса разрушения материала в данной точке.

Общее решение уравнения (1) можно выразить с помощью весовой функции

$$W(t) = \frac{1}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t,$$

в форме интеграла

$$y(t) = \int_0^t W(s)x(t-s)ds. \quad (2)$$

Весовая функция представляет решение уравнения (1) при нулевых начальных усло-

виях и входном сигнале в виде  $\delta$ -функции:  $x(t) = \delta(t)$ , или решения однородного уравнения (1) при начальных условиях  $y(0) = 0$ ;  $y'(0) = 1$ . Кроме весовой функции, поведение системы (1) часто характеризуется переходным процессом, который представляет решение уравнения при входном воздействии  $X$  в виде ступенчатой функции  $x(t) = \theta(t)$ ,

где  $\theta(t) = 0$  при  $t < 0$  и  $\theta(t) = 1$  при  $t \geq 0$ .

Из формулы (2) видно, что переходный процесс представляет интеграл от весовой функции, он равен

$$y_{пер}(t) = \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} [1 - e^{-\alpha t} (\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t)].$$

Анализ переходного процесса показывает, что он достигает максимального значения

в момент  $t = \frac{\pi}{\omega}$ , которое равно  $\frac{1 + e^{-\frac{\alpha\pi}{\omega}}}{\alpha^2 + \omega^2}$ .

Предельное (установившееся) значение переходного процесса равно

$$y_{пред} = \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2}.$$

На рисунке 1 изображены весовая функция и переходной процесс системы (1) для значений параметров  $\alpha = 0,02$  и  $\omega = 5$ .

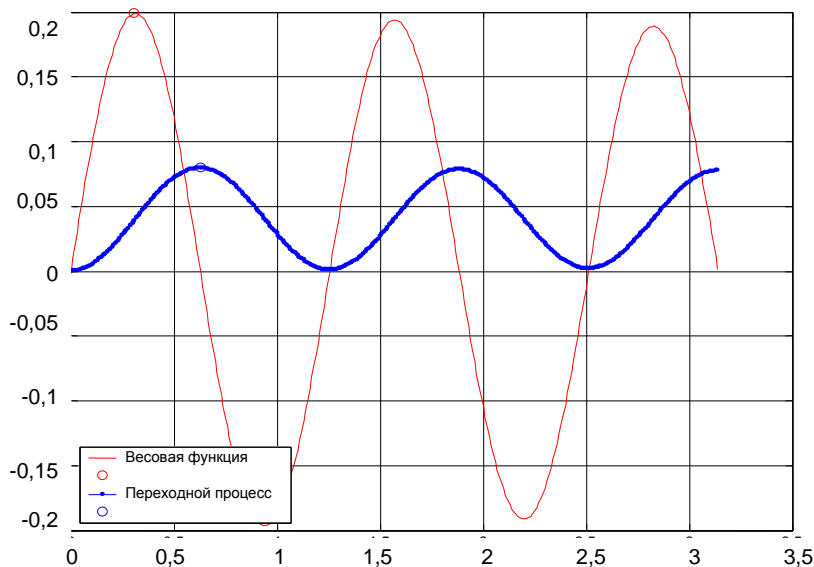


Рисунок 1 – Вид весовой и переходной функций

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ РАСКРОЕ ВОДОЛЕДЯНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Выбраны типичные для исследуемых процессов параметры системы: небольшое демпфирование и значительная собственная частота. В механической интерпретации изображенные на графике кривые весовой функции и переходного процесса представляют зависимости деформации разрезаемого материала, вызванные единичным импульсом и единичной ступенькой, от времени. Кроме того, на графиках кривых отмечены точки максимума деформации. Рисунок показывает, что использование импульса вместо ступеньки позволяет добиться большей максимальной деформации и большей скорости возрастания деформации.

При замораживании струи жидкости из отрезка струи длиной единица образуется несколько льдинок, таким образом, непрерывное нагружение заменяется несколькими импульсами. Была составлена программа расчёта деформации при нагружении материала несколькими одинаковыми, равномерно распределёнными на единичном отрезке импульсами суммарной интенсивности еди-

ница. Результаты расчётов представлены на рисунке 2.

На этом рисунке изображены графики зависимости деформации от времени при подаче двух и десяти импульсов, а также при подаче непрерывного постоянного нагружения единичного уровня на бесконечном интервале и интервале длины единица. Последние два графика в области  $0 < t < 1$  не отличаются. Импульсные нагружения приводят к большей деформации, причём деформация увеличивается с уменьшением количества импульсов. Это приводит к выводу, что замораживание повышает эффективность резания за счёт замены непрерывного нагружения импульсным.

Представленное теоретическое обоснование эффективности водоледающего резания ЛРМ позволяет в дальнейшем разрабатывать новые технологические процессы раскря материалов различного состава, а также создавать оборудование для реализации данного процесса.

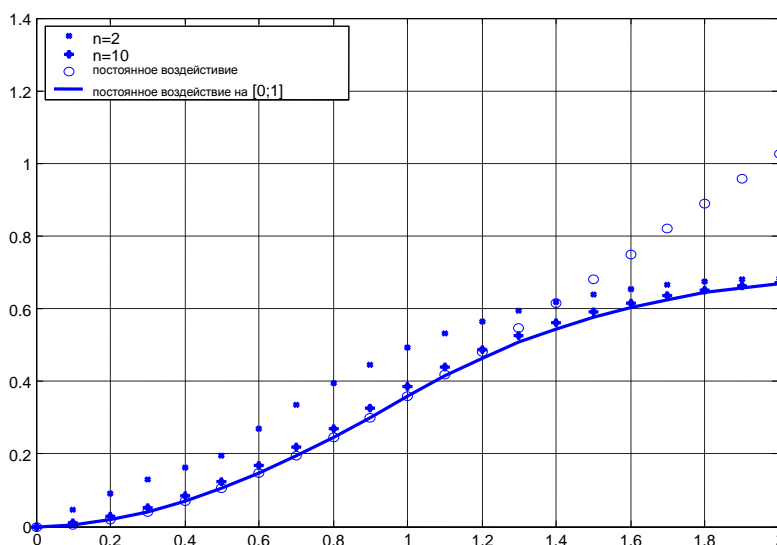


Рисунок 2 – Зависимости деформации от времени при непрерывном и импульсном резании настила материала

Проведенные авторами экспериментальные исследования по водоледающему раскряю настилов ЛРМ различного состава полностью подтверждают проведенные теоретические исследования о повышении производительности и качества раскря по сравнению с гидрорезанием данных материалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров, Р. А. Гидрорезание неметаллических материалов / Р.А. Тихомиров, В.С. Гуенко. – Киев.: Техника, 1984. – 149 с.
2. Hashish, M. C. The formation of cryogenic and abrasive – cryogenic jets / M.C. Hashish, M. Duhcky / 6<sup>th</sup> American Water Jet Conference August 24-27, 1991: Texas.