

УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА РЕЗАЊА НА ГУБИТАК МАСЕ ПРИ ОБРАДИ ПЛОЧЕ ИВЕРИЦЕ АWJС МЕТОДОМ

СРЂАН СВРЗИЋ¹
МАРИЈА МАНДИЋ
ГРАДИМИР ДАНОН

Извод: Технологија обраде воденим млазом са абразивом (*Abrasive Water Jet Cutting - AWJC*) представља ефикасан вид механичке обраде дрвета и композита на бази дрвета. Веома важна особина *AWJC* је та да је пропиљак који настаје при обради (у раду изражен преко подужног губитка масе) изузетно мали те су губици материјала минимални. Последње својство *AWJC* је веома важно при кројењу плоча на бази дрвета ради оптималног квантитативног искоришћења стандардних формата плоча. У овом раду акценат је стављен на стандардну трослојну иверицу дебљине 18 mm. Дефинисани су параметри резања: радни притисак (p), растојање од врха млазнице до горње површине предмета обраде (h) и брзина помака млазнице (u). Променом параметара резања постављен је математички модел који указује на значајност утицаја појединог параметра на губитак масе по дужном метру материјала. Примењен је метод вишефакторног експеримента са три промене посматраних фактора. Коришћена је отогонална план матрица за смањење броја факторних комбинација. Губитак масе је одређиван гравиметријском методом за репрезентативну влажност узорака. Установљена је могућа адекватност предложеног модела, као и значајност утицаја појединих параметара резања.

Кључне речи: губитак масе, резање, водени млаз са абразивом, вишефакторни експеримент, плоча иверица, математички модел

EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON THE MASS LOSS IN MACHINING PARTICLE BOARDS USING AWJC METHOD

Abstract: *Abrasive Water Jet Cutting - AWJC* technology presents a highly efficient method for machining wood and wood-based composites. A very important property of *AWJC* is the reduction in the cutting kerf generated during the process (in this paper expressed as longitudinal mass loss), which minimizes the resulting wood waste. This property is of great importance in achieving the highest quantitative yield of standard board dimensions when cutting wood-based panels. This paper is focused on the conventional three-layered 18 mm thick particle board. The following cutting parameters were defined: working pressure p , distance between the nozzle tip and the upper surface of the board h and cutting speed u . By varying the cutting parameters, we established a mathematical model, which showed the effect of each parameter upon the longitudinal mass loss, expressed in grams per meter. The Multifactor Experiment Method was applied to these 3 factors with 3 levels of their magnitude. The orthogonal plan matrix was used to reduce the number of factorial combinations. Mass

1 др Срђан Сврзић, доцент, Универзитет у Београду Шумарски факултет, Београд, svrza@ptt.rs

др Марија Мандић, доцент, Универзитет у Београду Шумарски факултет, Београд, marija.mandic@sfb.bg.ac.rs

др Градимир Данон, ред. проф., Универзитет у Београду Шумарски факултет, Београд, gradimir.danon@sfb.bg.ac.rs

loss was determined by gravimetric method for standard moisture content of the specimens. We determined the potential adequacy of the model and the significance of the cutting parameters.

Keywords: mass loss, cutting, abrasive water jet, multi-factor experiment, particle board, mathematical model

1. УВОД

У циљу рационалнијег коришћења дрвета и производа на бази дрвета посебан акценат може се ставити на смањењу отпада који се јавља при процесима механичке обраде резањем. Једна од потенцијално применљивих метода је употреба **AWJC**, резање материјала воденим млазом са суспендованим честицама абразива, која се у технологијама за прераду дрвета појављује у последњих неколико година. Поређењем ове методе са конвенционалним типовима обраде уочавају се предности коришћења **AWJC** у виду: 1) могућности резања по било каквој кривој контури чак и малих пречника кривине; 2) резања са веома великом тачношћу и бољим квалитетом површине реза; 3) елиминације ломљења и крзања материјала и 4) смањења количине пропиљка и загађења радне средине дрвним честицама.

На основу радова публикованих од стране других аутора (Bryan, BL., 1963, Haris, HD., 1970, Franz, NC., 1970), дошло се до закључка о параметрима резања који би могли да буду од пресудног значаја за испитивање подужног губитка масе при овом виду обраде. На основу истраживања King, G. (2002), дошло се до закључка о могућем смањењу дрвног остатка у технологији пиланске прераде дрвета. Ту се такође износе основе теорије резања дрвета **AWJC** и предлаже се потребна опрема за њено коришћење у пиланским условима. Предикциони модел дубине пенетрације воденог млаза код **AWJC** при резању полимерне матрице развили су Wang, Guo (2002). Предложено је да математички модел може да пружи довољно добро предвиђање за потребе планирања процеса за различите дебљине материјала. За побољшање квалитета изрезане површине Chen, FL. *et al.* (2002.) предлажу систем резања са оцилирајућом млазницом. Применом **AWJC** на масивном дрвету за 16 дрвних врста (Lee 2004.) показан је утицај брзине помера u и густине дрвета ρ на храпавост површине и ширину пропиљка. Коришће брзине сусе налазиле у распону од 200 до 750 mm/min. Смањење храпавости површине и повећање ширине пропиљка су у поменутом раду стајали у директној вези са смањењем брзине резања u и густине дрвета ρ . На основу геометрије млаза код **AWJC** предложеног од стране Birtu, C., Avramescu, V. (2012.), растојање од млазнице до предмета који се реже има значајан утицај на количину еродираниог материјала. Показана је зависност геометрије реза, дубине пенетрације и промене силе воденог млаза од променом растојања h , при резању алуминијума, стакла и челика. Такође, установљена је позитивна зависност промене силе воденог млаза са повећањем притиска p .

Анализом литературе и резултата до којих се у овој области дошло

постављен је циљ рада, који се огледа у постављању зависности између изабраних параметара *AWJC* и губитка масе материјала као посредног податка о количини отпатка који се јавља при овом виду обраде плоче иверице и других комозитних материја на бази дрвета. Рационализација технологије кројења би за крајњи циљ могла да има боље квантитативно искоришћење сировине у виду оптимизације кројних шема условљених предностима које пружа *AWJC* у односу на конвенционалне видове резања.

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

Предмет истраживања била је комерцијална трослојна иверица дебљине 18 mm, произвођача KRONOSPAN SRB d.o.o. Лапово. За потребе истраживања искројено је 270 узорака, димензија 200×50 mm. Сваки узорак је обележен ознаком режима услова којима ће бити подвргнут. За потребе одређивања влажности узорака искројено је 10 епрувета формата 50×50 mm, према стандарду EN-322. Иницијална мерења су се односила на одређивање масе сваког појединачног узорка пре разрезавања воденим млазом као и за потребе одређивање садржаја влаге. Почетна влажност је важан податак с обзиром да ће епрувете у току обраде воденим млазом примити одређену количину воде.



Слика 1. Припремљени узорци у сушници
Figure 1. Prepared samples in the oven



Слика 2. Обрадни центар WJS NC3015 E
Figure 2. Water Jet Cutting System WJS NC3015 E

Након изрезавања, *AWJC* узорци су кондиционирани до постизања константне масе на собној температури од 21°C и релативној влажности ваздуха од 60%. Добијена равнотежна влажност представља његову почетну влажност. Постизањем почетне влажности омогућено је поновно мерење масе ради установљавања разлике, тј. губитка масе приликом процеса обраде *AWJC*. Разрезавањем по средини дужине узорака формирају су по два нова комада. Губитак масе $\Delta m = (m_0 - m) / l \cdot 1000$ [g/m], представља разлику почетне масе узорка m_0 и збира маса новонасталих комада m , након њиховог поновног кондиционирања.

Припремљене епрувете за одређивање губитка масе су резане на нумерички контролисаној машини WJS NC3015 E, произвођача WJS Waterjet,

Шведска. Техничке карактеристике **AWJC** обрадног система су: површина радног стола 3200×1750 mm; радна површина 3100×1510 mm; тачност $\pm 0,05$ mm; брзина помера до 10000 mm/min.; брзина помоћног кретања по z оси до 4000 mm/min.; радни притисак до 4000 bar; гранат као коришћени абразив. Параметри који су варирани у току експеримента (фактори) су били: радни притисак p , растојање млазнице од епрувете (предмета рада) h и брзина помера млазнице u . Број нивоа по фактору је износио 3.

Табела 1. Вредност испитиваних параметара обраде

Table 1. The values of the observed cutting parameters

Притисак p (Мра)		Растојање од површине обраде h (mm)		Брзина помера u (mm / min)	
p_1	200	h_1	2,5	u_1	500
p_2	250	h_2	5	u_2	600
p_3	300	h_3	10	u_3	700

За постављање математичког модела коришћен је вишефакторни ортогонални план (Box-Wilson-ов план), на основу кога се формира матрица плана експеримента са кодираним вредностима фактора, где ознака -1 представља доњу границу, 0 средњи или основни ниво и 1 горњу границу интервала варијације испитиваних параметара.

Табела 2. План-матрица потпуног ортогоналног плана првог реда

Table 2. Plan-matrix of the complete first-order orthogonal plan

Експерим. тачке	ПЛАН - МАТРИЦА				Вектор излаза
	x_0	x_1	x_2	x_3	
1	1	1	1	1	y_1
2	1	1	-1	1	y_2
3	1	-1	1	1	y_3
4	1	-1	-1	-1	y_4
5	1	0	0	0	y_5
6	1	-1	1	-1	y_6
7	1	0	0	0	y_7
8	1	1	1	-1	y_8
9	1	-1	-1	1	y_9
10	1	0	0	0	y_{10}
11	1	0	0	0	y_{11}
12	1	1	-1	-1	y_{12}
Коефицијенти вишеструке регресије	b_0	b_1	b_2	b_3	Грешке:
Основни ниво		x_{01}	x_{02}	x_{03}	$s^2(y)$
Интервал варијације		w_1	w_2	w_3	$s(b_0)$
Горњи ниво		x_{g1}	x_{g2}	x_{g3}	$s(b_2)$
Доњи ниво		x_{d1}	x_{d2}	x_{d3}	$s(b_3)$

Линеарни коефицијенти вишеструке регресије b_i се одређују као.

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{ik} y_k; \quad i = 0, 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

где су:

x_{ik} – вредност фактора x_u у k -том експерименту,
 y_k – вредност функције циља у k -том експерименту,
 N – број експеримента.

Слободни члан b_0 одређује се из израза:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k \quad (2)$$

а коефицијенти регресије који дефинишу узајамно дејство фактора одређује се из:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{ik} x_{jk} y_k, \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad i < j \quad (3)$$

За оцену сигнификантности параметара модела користи се неки од познатих критеријума: t – студентов или F – критеријум.

$$F_{ri} = \frac{N b_i^2}{s^2(y)} = \frac{N b_i^2}{s_E^2}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

$$t_{ri} = \frac{|b_i|}{s(b_i)} = \frac{|b_i| \sqrt{N}}{s(y)} = \frac{|b_i| \sqrt{N}}{s_E} \quad (5)$$

Ако се докаже да је $F_r > F_t$ или $t_r > t_t$ за одређени ниво значајности α тада је параметар модела b_i сигнификантан, при чему се t_t и F_t узимају из одговарајућих таблица.

Оцена адекватности модела се врши на основу Фишеровог критеријума за оцену адекватности.

$$F_{rLF} = \frac{s_{LF}^2}{s_E^2} \quad (6)$$

У теорији класичног резања утицај параметара се најчешће дефинише преко степене функције облика:

$$R = C \prod_{i=1}^k f_i^{p_i} \quad (7)$$

где су:

C, p_i – параметри процеса;
 f_i – вредност фактора, и
 k – број фактора.

За изабране параметре процеса имаће се једначина трофакторног експеримента облика:

$$R = C \cdot f_1^{p_1} \cdot f_2^{p_2} \cdot f_3^{p_3} \quad (8)$$

3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА

Мерењима је установљено да је просечна почетна влажност узорака износила 8,627%. Након резања воденим млазом дошло је до очекиваног повећања влажности епрувета иверице на просечних 27,06%. Након сушења и кондиционирања узорака, влажност је враћена на почетне вредности, са одступањима која нису која нису прелазила праг значајности од 5 % релативне промене, после чега је било могуће приступити мерењу губитка масе.

Резултати губитка масе за комбинације фактора обраде, добијених гра-виметријском методом за плочу иверицу, приказани су у табели 3.

Табела 3. Експериментални резултати за плочу иверицу

Table 3. Experimental results for the particle board

Притисак	Растојање предмета обраде од врха млазнице (mm)								
	2,5			5			10		
	Брзина помера млазнице (mm / min.)								
	500	600	700	500	600	700	500	600	700
Средња вредност експерименталних резултата (g/m)									
200 MPa	5,2	5,8	6,12	14,02	12,32	12,46	14,92	15,62	12,72
250 MPa	4	9	3,74	4,46	9,91	7,12	11,68	9,6	13,9
300 MPa	4,52	1,8	5,88	3,1	4,08	11,64	14,62	21,88	20,5

На основу експериментално добијених резултата постављене су одговарајуће план- матрице потпуног ортогоналног плана за посматрани материјал и извршено је постављање математичког модела дејства изабраних параметара.

Математички модел утицаја параметара на губитак масе Δm код плоче иверице је добијен у облику функције:

$$\Delta m = 0,767 \cdot p^{0,057} \cdot h^{1,309} \cdot u^{0,316} \quad (9)$$

За оцену сигнификантности параметара и адекватности математичког модела постављене су табеле план-матрице (табела 4).

На основу једначине (9) и података у табели 4, могуће је извршити проверу сигнификантности параметара процеса. На тај начин је применом F – теста утврђено да за математички модел дејства параметара при **AWJC** на иверици, фактор радног притиска није сигнификантан ($F_t = 10,13 > F_r = 0,28$), док су растојање млазнице и њен помер сигнификантни фактори. У случају растојања млазнице $F_r = 50,455$ а за помер $F_r = 0,89$. Предложени математички модел према граници поузданости од 95 % има $F_r = 0,562$ што је мање од табличне вредности за одговарајуће степене слободе од $F_t = 9,01$. Овим је потврђена адекватност предложеног модела.

Табела 4. План матрица провере сигнификантности параметара и адекватности модела за иверицу

Table 4. Plan matrix for testing the parameter significance and the model adequacy for the particle board

Редни број	План матрица				Резултати мерења		Моделски резултати		Грешка
	x_0	x_1	x_2	x_3	$m(g)$	$y=\ln m$	$m(g)$	$y^{\wedge}=\ln m$	$(y_u - y_u^{\wedge})^2$
1	1	1	1	1	20,50	3,02042	17,84027	2,881459	0,019312
2	1	1	-1	1	5,88	1,77156	6,167886	1,819356	0,002285
3	1	-1	1	1	12,72	2,54318	16,48187	2,802261	0,067125
4	1	-1	-1	-1	5,20	1,64866	4,948309	1,599046	0,002461
5	1	0	0	0	11,80	2,4681	9,395701	2,240252	0,051914
6	1	-1	1	-1	14,92	2,7027	14,31272	2,661148	0,001727
7	1	0	0	0	9,80	2,28238	9,395701	2,240252	0,001775
8	1	1	1	-1	14,62	2,68239	15,49234	2,740346	0,003359
9	1	-1	-1	1	5,88	1,77156	5,698247	1,740159	0,000986
10	1	0	0	0	7,70	2,04122	9,395701	2,240252	0,039614
11	1	0	0	0	11,50	2,44235	9,395701	2,240252	0,040842
12	1	1	-1	-1	4,52	1,50851	5,35614	1,678244	0,028809

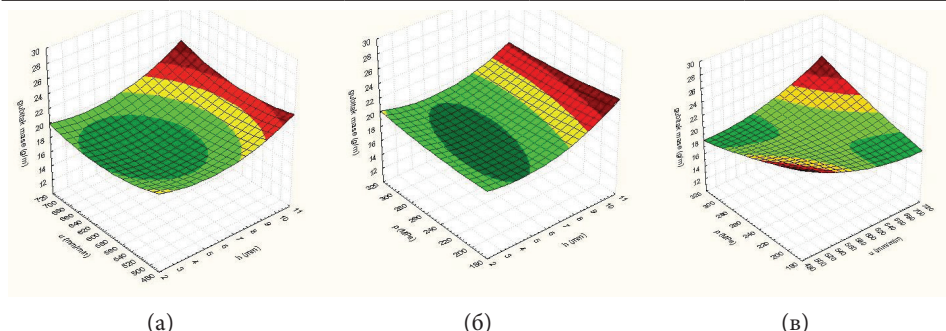


График 1. (а) Утицај брзине помака u и растојања h за вредност притиска $p=200$ МПа, (б) утицај брзине помака u и растојања h за вредност притиска $p=250$ МПа (в) утицај брзине помака u и растојања h за вредност притиска $p=300$ МПа на губитак масе код иверице

Graph 1. (a) Effect of cutting speed u and distance h at pressure $p=200$ MPa, (b) effect of cutting speed u and distance h at pressure $p=250$ MPa, (c) effect of cutting speed u and distance h at pressure $p=300$ MPa on mass loss in the particle board

Разлог оваквог понашања модела може се потражити у могућем релативном уском интервалу варијације вредности за притисак и помак. Један од могућих одговора заснива се на томе да је геометрија млаза, те посредно и геометрија пропиљка, релативно независна од изабраних вредности притиска, а у потпуности независна од брзине помака. У спроведеном испитивању дошло је до потпуног прорезивања свих узорака

што практично значи да је пређена доња критична вредност радног притиска воденог млаза која обезбеђује „чисти рез“. При томе су брзине помака остале у границама које нису значајно пореметиле наведену чињеницу, те се резултат несигнификантности параметара притиска и брзине помака млазнице може објаснити поменутиим запажањем.

Предложени математички модели јасно показују сигнификантност утицаја фактора растојања млазнице, те се утицаји притиска и помераја за изабране интервале вредности могу занемарити. Према томе модел се своди на утицај само једног фактора, тј. растојања млазнице од површине предмета обраде h . Зависност подужног губитка масе Δm се може илустровати функционалном зависношћу ове две променљиве

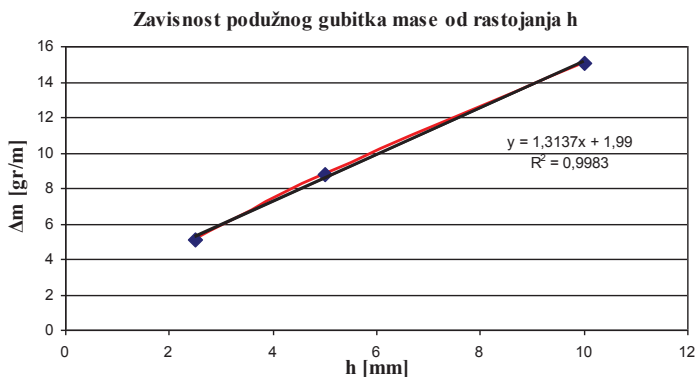


График 2. Утицај растојања млазнице и површине обратка на подужни губитак масе

Graph 2. Effect of the distance between the nozzle and the workpiece surface on the longitudinal mass loss

График 2. указује на линеарну зависност, између подужног губитка масе и растојања млазнице од предмета рада, која се може исказати преко функције:

$$\Delta m = 1,3137 \cdot h + 1,99 \quad (10)$$

Евидентна је изузетно јака линеарна зависност коју потврђује висок коефицијент детерминације од 0,9983.

4. ЗАКЉУЧАК

За вишефакторни експеримент подужног губитка масе при *AWJS* изабрани су параметри процеса: притисак p , растојање млазнице h и брзину помака u . Претпостављени математички модел је био у облику степене функције облика:

$$R = C \cdot f_1^{p_1} \cdot f_2^{p_2} \cdot f_3^{p_3} \quad (11)$$

На основу спроведене математичке обраде резултата, дошло се до математичког модела процеса у облику:

$$\Delta m = 0,767 \cdot p^{0,057} \cdot h^{1,309} \cdot u^{0,316} \quad (12)$$

Добијени математички модел јесте адекватан. Међутим, фактори (параметри) притиска и брзине помака млазнице нису показали сигнификантност. Због наведене чињенице извршена је редукција модела, који је дат изразом:

$$\Delta t = 1,313 \cdot h + 1,99 \quad (13)$$

На основу изнетог може се закључити да:

- експоненцијални облик функције математичког модела одговара испитиваном процесу обраде;

- изабрани нивои варијације параметара притиска и помака не обезбеђују њихов сигнификантни утицај на математички модел;

- растојање млазнице од површине предмета обраде има значајан утицај на вредност губитка масе при обради иверице **AWJC** методом;

- добијене и приказане вредности за подужни губитак масе показују оправданост употребе **AWJC** при резању плоче иверице у смислу повећања квантитативног искоришћења преко смањења отпатка.

У циљу потпунијег сагледавања утицаја изабраних параметара потребно је у будућим истраживањима извршити корекцију интервала варијације притиска и помака. На тај начин би ваљало обезбедити непотпуност пререзивања по дебљини испитиваних узорака (добивање уреза на епруветама). Такође, било би сврсисходно извршити анализу пререзане површине у циљу установљавања количине заосталог абразива и сходно томе његов утицај на варијацију измерених маса.

Напомена: Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Истраживање климатских промена и њихов утицај на животну средину - праћење утицаја, адаптација и ублажавање“ (ТР III 43007, Финансира Министарство за просвету науку и технолошки развој Републике Србије)

ЛИТЕРАТУРА

- Birtu C., Avramescu, V. (2012): Abrasive water jet cutting - technique, equipment, performances, Nonconventional Technologies Review, March, pp. 40 - 46.
- Bryan, BL (1963): High energy jets as a new concept in wood machining. For. Prod. J. (8): pp. 305–312
- Harris, HD. (1970) Cutting with high speed water jets. Manuf Dev. Nat. Res. Counc Canada 2(1):1–2
- Kinga, G. (2002): Abrasive water jet cutting: a possibility for minimizing waste in the sawmill industry. Forst Holz 57(7): pp. 215–216
- Lee, HW. (2004): Abrasive-assisted high energy water-jet machining characteristics of solid wood. J Korean Wood Sci. Technol. 32(3): pp.1–7
- Franz, NC. (1970a): High-energy liquid jet slitting of corrugated board. TAPPI 53(6): pp.1111–1114
- Franz, NC. (1970b): High velocity liquid jet. US Patent No 3,524,367
- Franz, NC. (1970c): Method of high velocity liquid jet cutting of soft materials. US Patent No 3,532,014

- Franz, NC. (1972): Fluid additives for improving high velocity jet cutting. In: Proc first international symposium on jet cutting technology. BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp 93–104. Paper A7
- Franz, NC. (1974): The influence of stand-off distance on cutting with high velocity fluid jets. In: Proc second international symposium on jet cutting technology. BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp 37–46. Paper B3
- Chen, FL., Siores, E., Patel, K. (2002): Improving the cut surface qualities using different controlled nozzle oscillation techniques. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42:717–722

EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON THE MASS LOSS IN MACHINING PARTICLE BOARDS USING AWJC METHOD

*Srdjan Svrzić
Marija Mandić
Gradimir Danon*

Summary

The goal of the study was to determine the possible effects of cutting parameters of the *AWJC* upon the material mass loss. Potential positive results may lead to more efficient machining of boards. The material selected for this study was three-layered conventional particle board. Three most common *AWJC* parameters were selected for this paper: working pressure p , nozzle to workpiece distance h and cutting speed (nozzle movement velocity) u . The magnitude level of the selected parameters was set to three: zero or referent level, lower, and upper level, denoted as 0, -1, and 1, respectively. Multifactor Experimental Plan was applied for the purpose of establishing the relationship between the selected parameters and the experimental output presented as longitudinal mass loss. Pre-research referred to the moisture content of the samples before *AWJC* was applied. The same investigations were conducted after the cutting and throughout the drying and conditioning phase. After the samples had reached the initial moisture content, it was possible to determine the difference in the mass. Based on these results and by applying the orthogonal plan matrix, the established mathematical model proved only the significance of the nozzle to workpiece distance h . Hence, the adequate model incorporating all three parameters had to be reduced to just one. The possible explanation could be found in the narrow variation interval of the working pressure, high pressure values compared to the threshold needed for the clean cut or cutting speed to pressure relationship. Obviously, the geometry of the beam formed at the nozzle which depends upon the distance h had the major influence on the mass loss in the presented research. However, in view of future examinations, some additional analyses may take place, such as investigation of the cut surfaces with the aim of establishing the presence of abrasive particles, and its possible influence on the mass of the samples. Reducing the pressure below the threshold, which would provide just the engraving of particleboard samples, could possibly provide adequate data for better understanding of its influence as a cutting parameter. Future research studies would recommend the same procedure for the cutting speed.