



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Влияние параметров сквозного деформирующего резания на характер получаемых щелевых фильтрующих структур

Дмитрий Бузаев<sup>a, \*</sup>, Николай Зубков<sup>b</sup>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7258-7379>,  [dm.buzaev@bmstu.ru](mailto:dm.buzaev@bmstu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3757-1299>,  [zoubkovn@bmstu.ru](mailto:zoubkovn@bmstu.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.042:542.67

#### История статьи:

Поступила: 09 августа 2021

Рецензирование: 31 августа 2021

Принята к печати: 16 октября 2021

Доступно онлайн: 15 декабря 2021

#### Ключевые слова:

Фильтрация

Фильтрующие трубы

Регенерация противотоком

Щелевые фильтры

Деформирующее резание

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Щелевые фильтры востребованы в нефтехимической, машиностроительной, пищевой, горнообогатительной и других отраслях промышленности. Деформирующее резание (ДР) является методом лезвийной обработки, основанном на подрезании и пластическом деформировании поверхностного слоя заготовки без его отделения в виде стружки, и выделяется среди других методов образования щелевых структур возможностью получения фильтров высокой тонкости фильтрации (ширина щелей от 20 мкм) при сравнительно высокой производительности и безотходности. Однако закономерности сквозного прорезания металлов методом ДР практически не были изучены ранее. **Цель работы:** установление влияния основных параметров деформирующего резания: подачи и глубины резания – на характер получаемых структур, а также выявление сочетаний параметров, при которых обеспечивается получение структур, пригодных для фильтрации. **Методом исследования** являлись эксперименты по сквозному прорезанию гофров, отштампованных на лентах из меди, и визуальный анализ полученных структур. Прорезание гофров методом ДР производилось на токарном станке с использованием приспособления – барабана с натяжителем. **Результаты и обсуждение.** Характерные структуры, полученные при различных сочетаниях глубины резания и подачи, были систематизированы и выделены в следующие группы: 0 – отсутствие сквозного прорезания; 1 – равномерные щели; 2 – «двойникование» (попарное сближение стенок щелей); 3 – срывы через одно ребро; 4 – нерегулярные либо постоянные срывы; 5 – равномерные щели с образованием сплошного заусенца – «юбки» – на внутренней стороне гофра вдоль ряда щелей; 6 – равномерные щели с неполностью раскрывшейся «юбкой». В интервале подач 0,2...0,4 мм/об с увеличением глубины резания наблюдается переход от структур группы 1 к структурам группы 2, причем чем больше подача, тем больше максимальная глубина резания, при которой сохраняются равномерные щели. Группа 1 отнесена к области структур, пригодных для задач фильтрации, однако она характеризуется образованием индивидуальных заусенцев с внутренней стороны щелей. При меньших подачах (до 0,2 мм/об включительно) с дальнейшим увеличением глубины резания достигается ещё одна область структур, признанных пригодными для получения фильтров, – групп 5 и 6. При образовании «юбки» отсутствуют индивидуальные заусенцы для каждой щели, форма щелей более чистая. С уменьшением подачи уменьшается ширина получаемых щелей. Наименьшая подача, при которой получены равномерные щели, 0,05 мм/об, что соответствует ширине щелей 19 мкм. Установление причин образования «юбок» и «двойникования» потребуют дальнейшего исследования.

**Для цитирования:** Бузаев Д.А., Зубков Н.Н. Влияние параметров сквозного деформирующего резания на характер получаемых щелевых фильтрующих структур // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 33–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-33-46.

### Введение

Необходимость фильтрации жидкостей и газов возникает во многих отраслях промышленности, таких как нефтехимическая, машино-

строительная, пищевая, горнообогатительная и другие, а также при организации различных систем водоснабжения [1].

Из металлических фильтроэлементов получили распространение сетчатые [2], а также полученные методом порошковой металлургии и из металлической пены с диаметром пор от 50 мкм [3] и др.

В большинстве случаев при загрязнении фильтроэлемента необходима остановка процесса фильтрации для его замены [2], что тре-

#### \*Адрес для переписки

Бузаев Дмитрий Александрович, ассистент  
 Московский государственный технический университет  
 им. Н.Э. Баумана,  
 ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,  
 105005, г. Москва, Россия  
 Тел.: +7 (903) 679-96-59, e-mail: [dm.buzaev@bmstu.ru](mailto:dm.buzaev@bmstu.ru)

бует значительных расходов. Перспективными являются регенерируемые конструкции фильтров, осуществляющие его очистку противотоком фильтрующей среды [4]. Щелевая структура фильтра в таких конструкциях предпочтительна, так как обеспечивает как сравнительно низкое гидравлическое сопротивление, так и высокую эффективность очистки противотоком [5]. Очистка противотоком выполняется без разборки фильтра и увеличивает эксплуатационный ресурс фильтроэлемента в 20 и более раз [6].

Среди щелевых фильтров наиболее распространены сборные конструкции, а также конструкции, получаемые механической или физико-технической обработкой [7, 8].

На основе проволоки получают сетки, в том числе с неквадратными ячейками, пружинные и каркасно-проволочные фильтроэлементы. Ленточные и пластинчатые фильтры также относятся к сборным конструкциям и не отличаются высокой технологичностью и производительностью их получения. По комплексу эксплуатационных параметров наиболее перспективны каркасно-проволочные сетки с возможностью получения щелевых зазоров от 20 мкм, однако их высокая стоимость ограничивает широкое применение [9].

Механические методы получения сквозных щелей основаны на фрезеровании стенки трубы дисковыми фрезами и методах обработки давлением. Широкую номенклатуру щелевых сеток получают обработкой давлением как методом штамповки щелей, так и методом одновременной просечки и вытяжки [10].

Перспективным направлением в изготовлении щелевых фильтрующих перегородок является применение лазерной и электроэрозионной прошивной или проволочной обработки [11, 12]. В качестве заготовки могут использоваться листы или трубы различного профиля. Ограничением использования является высокая стои-

мость оборудования и относительно низкая производительность.

Перечисленные методы получения металлических щелевых фильтрующих перегородок имеют ограничения либо по минимальной ширине получаемых щелей, либо по производительности их получения, что сказывается на ограничении эксплуатационных характеристик и высокой себестоимости их изготовления.

В данной работе рассматривается получение фильтрующих структур методом деформирующего резания (ДР).

Деформирующее резание является запатентованным видом лезвийной обработки резанием с использованием специального инструмента [13]. Метод основан на подрезании и пластическом деформировании подрезанных слоев с формированием макрорельефа в виде оребрения (рис. 1). Особенности этого метода являются безотходность, а также возможность получения узких (до десятков микрон) межреберных зазоров при глубине зазоров до единиц миллиметров.

Ранее рассматривалась возможность получения фильтрующих титановых сеток методом ДР из тонколистовых заготовок с получением минимального размера фильтрующих щелей

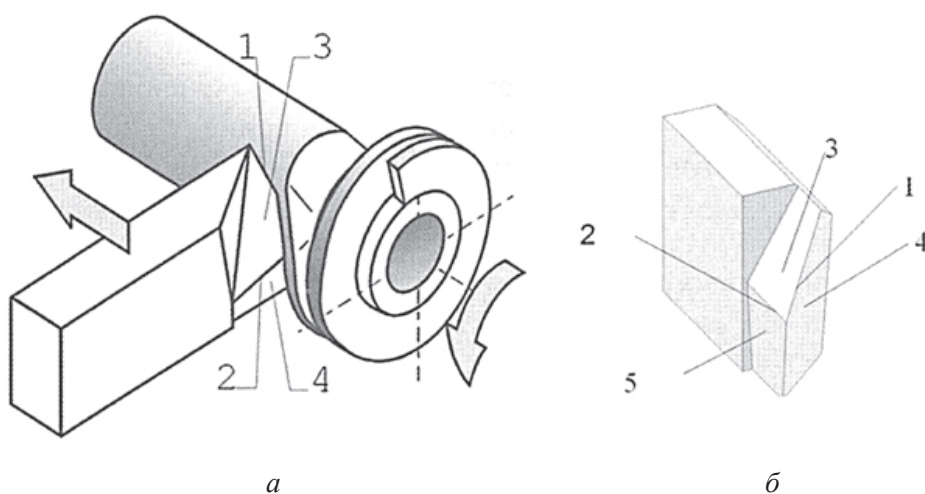


Рис. 1. Схема оребрения труб методом ДР (а) и инструмент для его реализации (б):

1 – режущая кромка; 2 – деформирующая кромка; 3 – передняя поверхность; 4 и 5 – главная задняя и вспомогательная задняя поверхности

Fig. 1. Scheme of pipe finning by the DR method (a) and the tool for its implementation (b):

1 – cutting edge; 2 – deforming edge; 3 – front surface; 4 and 5 – main back and auxiliary back surfaces

от 20 мкм с возможностью увеличения размеров ячейки растяжением до единиц миллиметров [14].

Ранее было проведено исследование по изучению процесса получения щелевых структур методом ДР на полимерных трубах, в котором установлена целесообразность применения метода при получении регулируемых щелевых фильтрующих труб, предложены схемы обработки, выявлены особенности и ключевые зависимости процесса, даны рекомендации по реализации метода и проведены испытания эксплуатационных характеристик полученных фильтров [15, 16]. Физико-механические свойства полимерных материалов и их невысокая термостойкость существенно ограничивают область их применения. Металлические фильтро-элементы с щелевой структурой, полученной ДР, устраняют эти недостатки. Принцип получения фильтрующих щелевых металлических труб при сквозном прорезании участков специальных профилей был опубликован ранее [17]. Однако влияние технологических параметров сквозного прорезания металлической заготовки методом ДР на форму и геометрические параметры получаемых щелей не исследовалось. Цель данной работы – установление влияния параметров ДР, а именно подачи и глубины резания на характер, форму щелевых структур, получаемых методом сквозного ДР на медных образцах.

### Методика исследований

На предыдущих этапах исследования было апробировано и признано целесообразным использование в качестве заготовок для металлических фильтров продольно гофрированных (звездообразных) труб (рис. 2), полученных с помощью шариковых фильер [18].

Продольно гофрированные трубы доступны для получения в промышленных масштабах с использованием специального оборудования [19] и представляют интерес в качестве заготовок при серийном производстве фильтрующих труб. Однако их получение само по себе является достаточно сложной технологической задачей, которую необходимо решать для каждого типоразмера и материала заготовки.

Для изучения процесса сквозного прорезания методом ДР и получения массива эксперимен-

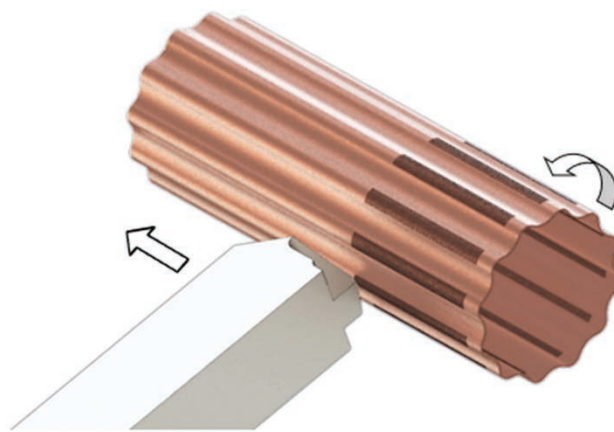


Рис. 2. Прорезание щелей на продольно гофрированной трубе методом ДР

Fig. 2. Cutting slots on a longitudinally corrugated pipe using the DR method

тальных данных более целесообразной признана схема обработки единичных гофров, изготовленных на металлической ленте с использованием специального приспособления (рис. 3), установленного на токарно-винторезный станок модели 16Б16КА.

Гофрированная лента 2 обернута вокруг барабана 5, установленного на токарно-винторезном станке. Плотное прилегание ленты к барабану осуществляется за счет радиального перемещения подпружиненного натяжителя 4, в который зажаты оба конца ленты. В качестве допущения принято, что натяжение ленты не приводило к изменению геометрических параметров ленты.

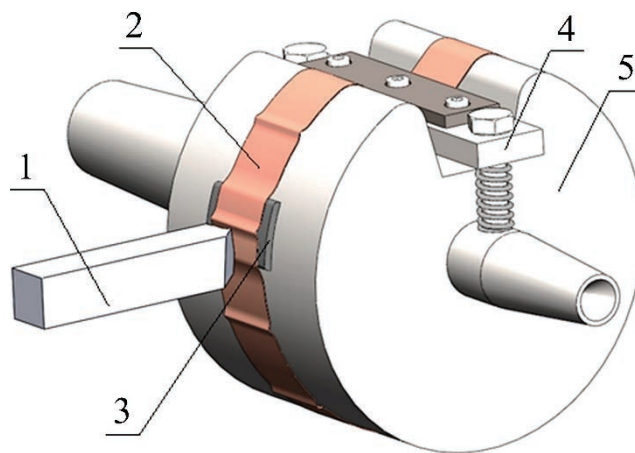


Рис. 3. Схема сквозного прорезания единичного гофра на барабане

Fig. 3. Scheme of cutting through a single corrugation using a barrel attachment

В рамках каждого эксперимента инструментом 1 для ДР прорезается только один из гофров ленты за счет подкладки 3 из полиэтилена низкого давления.

По сравнению с обработкой непосредственно гофрированных труб такая схема позволяет нивелировать влияние разнорысности гофров и биения трубы на прорезание щелей и упрощает контроль над процессом. Для каждого гофра глубина резания выставляется индивидуально от касания поверхности гофра вершиной резца, что позволяет получать более точные результаты экспериментов.

Гофры были получены штамповкой эластичной средой, в качестве которой был выбран твердый полиуретан (рис. 4).

Стальной формовочный прут 5 диаметром 1,5 мм размещался между лентой 2 и стальным пуансоном 3, после чего лента и прут с усилием запрессовывался пуансоном в полиуретановую подушку 4, помещенную в полости обоймы 1, в результате чего лента частично огибала прут, образуя гофр. Для взаимного позиционирования прутка и ленты в обойме предусмотрены направляющие пазы.

Геометрические параметры гофра (рис. 5) определяются диаметром прутка, толщиной и материалом ленты, а также усилием прессования

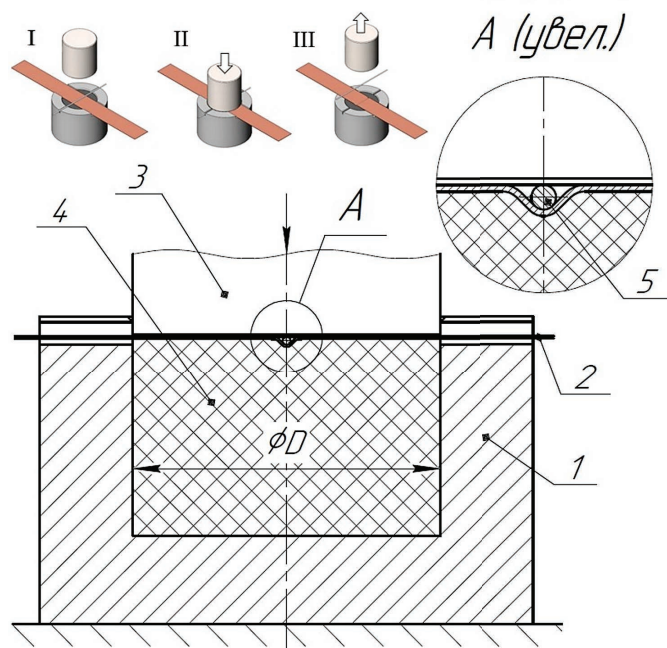


Рис. 4. Штамповка гофров полиуретаном

Fig. 4. Stamping corrugations with polyurethane

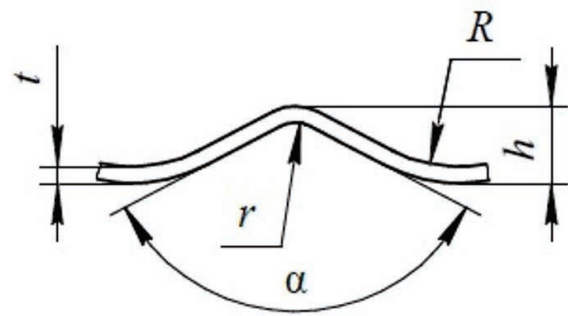


Рис. 5. Параметры получаемого гофра

Fig. 5. Parameters of corrugation obtained

и составляют  $t = 0,4$  мм;  $r = 0,75$  мм;  $R = 3,6$  мм,  $h = 1,9$  мм.

При получении щелей методом деформирующего резания зависимость их ширины  $b$  от подачи  $S_0$  и углов инструмента в плане  $\varphi$  и  $\varphi_1$  имеет вид [20]

$$b = S_0(\sin\varphi_1 - \sin\varphi).$$

В соответствии с данной зависимостью ширина щелей теоретически принимает нулевое значение при равенстве главного  $\varphi$  и вспомогательного  $\varphi_1$  углов инструмента в плане. Однако для фильтрации желательно иметь щелевой зазор, перпендикулярный к оси трубной заготовки, что требует назначения вспомогательного угла инструмента в плане  $\varphi_1$ , близким к  $90^\circ$ . Таким образом, ширина щелевого зазора будет определяться главным углом инструмента в плане  $\varphi$  и величиной подачи  $S_0$ . Зависимость теоретической ширины щелевого зазора от подачи инструмента при разных углах  $\varphi$  представлена на рис. 6. Влияние вспомогательного угла инструмента в плане  $\varphi_1$  на ширину щелевого зазора незначительно и показано на рис. 7.

Длина щелей  $l$  зависит от профиля гофров и глубины резания. После начала сквозного прорезания длина щелей резко увеличивается до достижения глубины резания  $t_r = 0,45$  мм, соответствующей окончанию радиусного участка  $r$  (см. рис. 5) на вершине гофра и переходу к боковым участкам. Так как сечение боковых участков профиля гофров близко к прямой, при дальнейшем увеличении глубины резания длина щелей возрастает линейно (рис. 8).

Из вышесказанного можно сделать вывод, что для обеспечения наибольшей пропускной способности фильтроэлемента при той же тон-

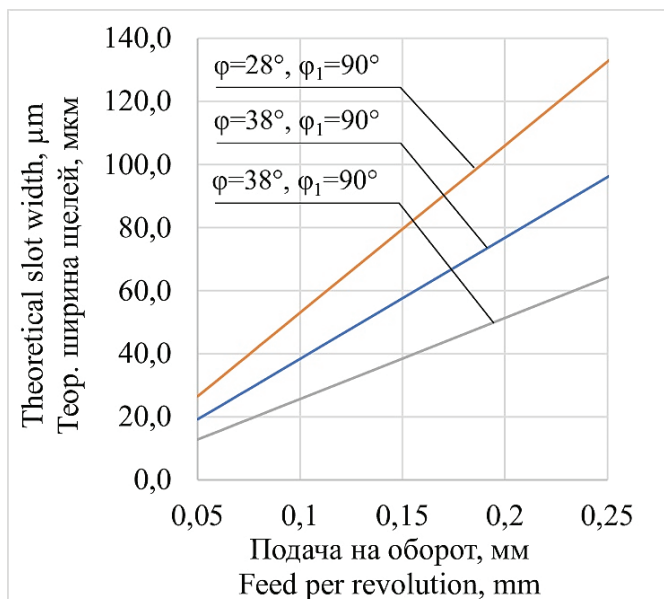


Рис. 6. Теоретическая ширина щелей  $b$  в зависимости от подачи инструмента  $S$  на оборот для различных значений главного угла в плане  $\varphi$

Fig. 6. Theoretical slot width vs tool feed for various values of major cutting edge angle  $\varphi$

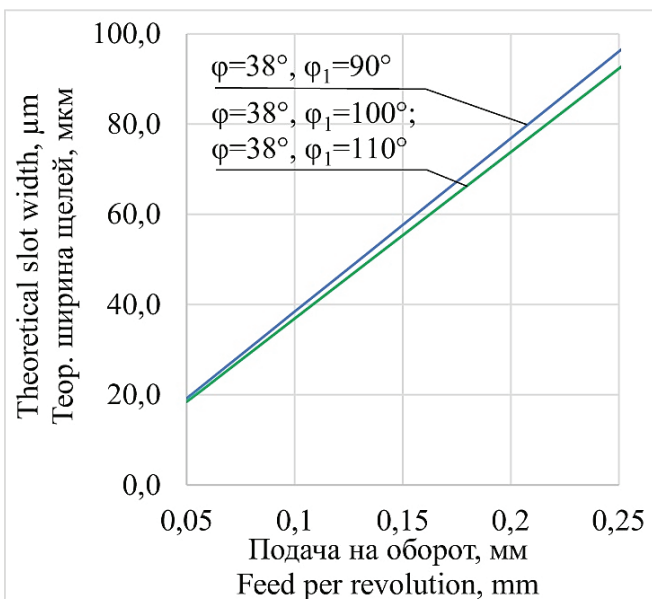


Рис. 7. Теоретическая ширина щелей  $b$  в зависимости от подачи инструмента  $S$  на оборот для различных значений вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$

Fig. 7. Theoretical slot width  $b$  vs tool feed  $S$  for various values of minor cutting edge angle  $\varphi_1$

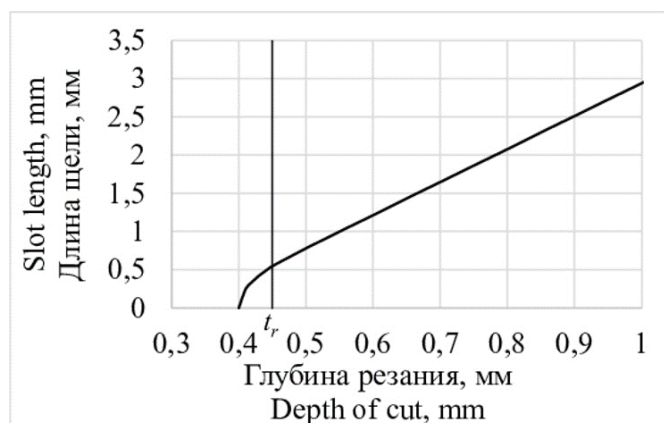


Рис. 8. Теоретическая длина щелей  $l$  в зависимости от глубины резания  $t$

Fig. 8. Theoretical slot length  $l$  vs depth of cut  $t$

кости фильтрации следует стремиться к глубине резания не меньше глубины  $t_r$ , обеспечивающей полное прорезание радиусного участка  $r$ .

В качестве инструментального материала для сквозного прорезания гофров методом ДР использовался твердый сплав H10F фирмы Sandvik Coromant. Параметры используемого при проведении экспериментов инструмента представлены в таблице. Погрешность угловых параметров составляла  $\pm 1^\circ$ .

Выбор геометрии инструмента для проведения эксперимента сделан на основе опыта применения резцов для деформирующего резания [21]: передний, главные и вспомогательные задние углы выбраны как типовые для резцов, предназначенных для получения оребрения методом ДР. Вспомогательный угол инструмента в плане  $\varphi_1$  назначен близким к  $90^\circ$  для обеспечения перпендикулярности щелевого зазора. Главный угол в плане назначен равным  $38^\circ$  из соображений получения наименьшего межреберного зазора при сохранении удовлетворительной конструктивной прочности инструмента.

#### Материал и геометрические параметры резца для ДР

##### Material and geometrical parameters of the DC cutter

$\varphi$	$\varphi_1$	$\gamma$	$\gamma_1^*$	$\lambda$	$\lambda_1^*$	$\alpha$	$\alpha_1$
$38,4^\circ$	$87,6^\circ$	$47^\circ$	$-60^\circ$	$54,4^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$	$3^\circ$

\* – для справок / for reference.

Значение скорости резания в рамках данного исследования было принято за константу и выбрано равным 207 м/мин исходя из удобства наблюдения за проведением эксперимента.

Диапазон глубины резания выбирался таким образом, чтобы в него входили границы, с одной стороны, начала сквозного прорезания материала, с другой – начала дестабилизации процесса получения щелей (нерегулярного или сплошного срыва ребер). При отсутствии срывов глубина резания увеличивалась до касания вершиной инструмента впадины гофра.

При выбранных углах в плане подача 0,4 мм/об согласно вышеприведенной формуле соответствует ширине щелей 151 мкм. При дальнейшем увеличении подачи стабильность процесса согласно известным закономерностям ДР будет только возрастать вплоть до достижения подач, при которых вместо ДР происходит обычное выдавливание материала. Поэтому значе-

ние подачи 0,4 мм/об было принято за верхнюю границу, а основное внимание уделено получению структур с меньшим межреберным зазором (и большей тонкостью фильтрации). Нижняя граница рассмотренных подач (0,05 мм/об) обусловлена технологическими возможностями используемого оборудования.

## Результаты и их обсуждение

По результатам 167 экспериментов при различных значениях подачи и глубины резания выделено 6 групп, на основе которых все множество рассмотренных сочетаний параметров ДР – подачи и глубины резания – было разделено на несколько областей (рис. 9) в зависимости от степени пригодности полученных структур для фильтрации. На диаграмме отмечался наиболее частый для каждой комбинации параметров результат по нескольким

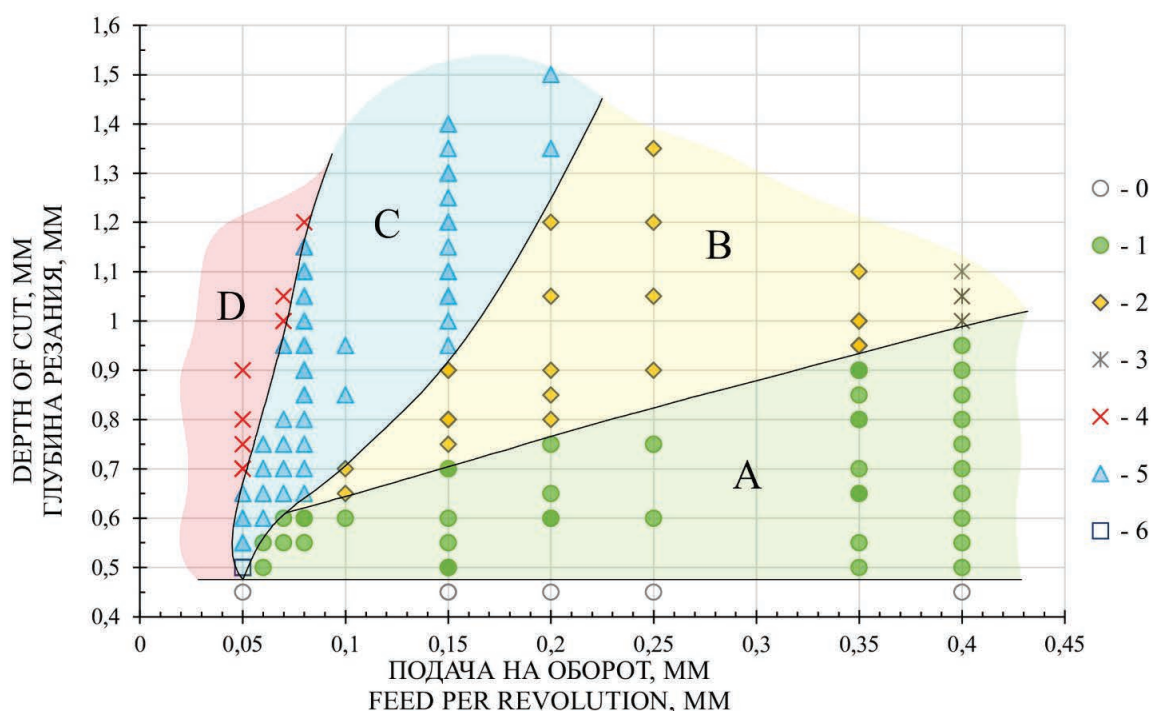


Рис. 9. Диаграмма форм структур, полученных при различных сочетаниях подачи и глубины резания:

0 – непрорез; 1 – равномерные щели; 2 – «двойникование»; 3 – срыв через одно ребро; 4 – нерегулярные/постоянные срывы; 5 – равномерные щели с образованием «юбки»; 6 – щели с частично нераскрывшейся «юбкой»

Fig. 9. Diagram of typical structures obtained under different combinations of tool feed and depth of cut:

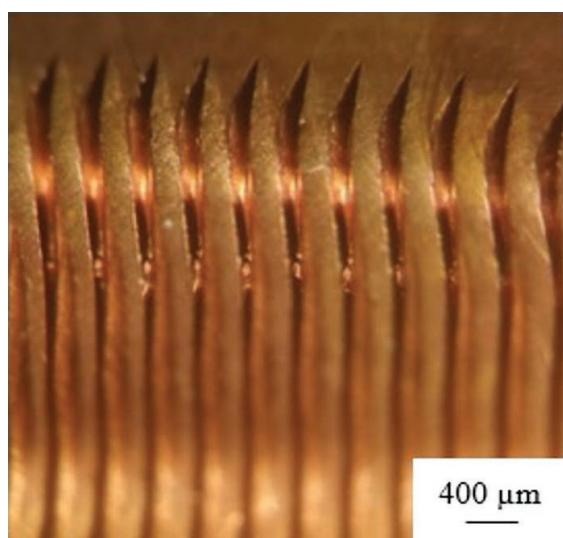
0 – absence of the through cut; 1 – uniform slots; 2 – “twinning”; 3 – stripping of every second slot wall; 4 – non-regular or complete stripping of slot walls; 5 – uniform slots with a formed “skirt”; 6 – uniform slots with a “skirt” opened incompletely

экспериментам. Каждая из групп результатов описана далее.

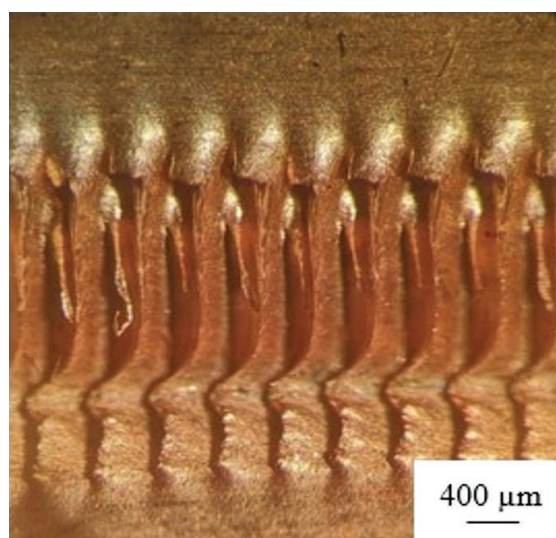
*Группа «0» – непрорез.* Оребрение на наружной поверхности гофров при отсутствии сквозного прорезания гофра отмечено на глубинах резания, превышающих номинальную толщину ленты, что объясняется погрешностью толщины ленты и упругими деформациями гофрированного профиля.

*Группа «1» – равномерные щели* (рис.10). Эта группа образует на диаграмме (см. рис. 9) область «А» (выделена зелёным), которая является целевой при изготовлении фильтрующих элементов. Процесс ДР стабилен, щели имеют

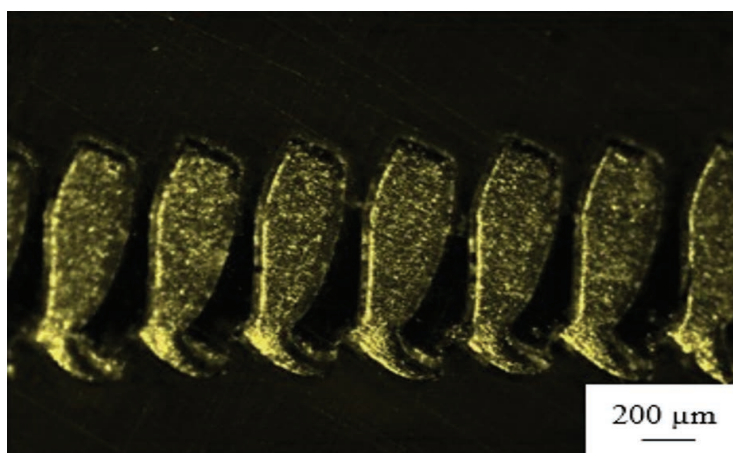
визуально равномерную ширину. В соответствии с известными для ДР зависимостями максимальная глубина резания, при которой сохраняется стабильность процесса, увеличивается с увеличением подачи. Минимальная подача, при которой в ходе экспериментов удалось получить равномерные щели такого типа – 0,06 мм/об при глубине резания 0,55 мм, чему соответствуют теоретические ширина и длина щелей 23 мкм и 1 мм соответственно. На внутренней стороне гофров отмечено образование заусенцев в каждом месте выхода резца из материала. Это следует учитывать в дальнейшем при практической реализации метода.



а



б



в

Рис. 10. Равномерные ряды щелей:

а – наружная сторона; б – внутренняя сторона; в – шлиф поперечного сечения щелей

Fig. 10. Uniform slots:

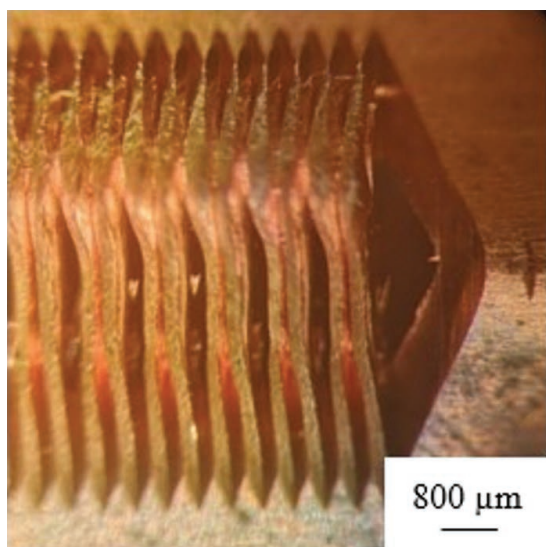
а – outer side; б – inner side; в – slots cross section

Группа «2» – двойникование (рис. 11). При глубинах резания, выходящих за пределы верхней границы области «А», отмечено попарное сближение ребер, ограничивающих щели, условно названное двойникованием, приводящее к «схлопыванию» каждой второй щели, что при неизменной толщине ребер увеличивает ширину несхлопнувшихся щелей. В отдельных случаях при дальнейшем увеличении глубины резания наблюдался также переход от попарного группирования ребер (дублетами) к группированию по 3 шт. (триплетами). Эти случаи также были условно отнесены к группе «2». Несмотря на то что такие структуры обладают регулярностью, на данный момент для них не обнаружено потенциального полезного применения для задач фильтрации, и потому они относятся к области

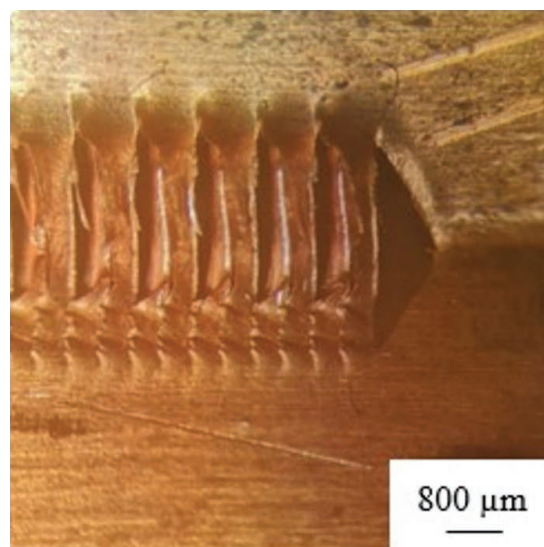
условного брака – область «В» на диаграмме (см. рис. 9).

Группа «3» – срыв через 1 ребро (рис. 12). При подаче 0,4 мм/об и глубине резания 1 мм и более отмечено попарное сближение ребер, сопровождающееся срывом одного из ребер в каждой паре. Данный эффект также отнесен к области условного брака «В».

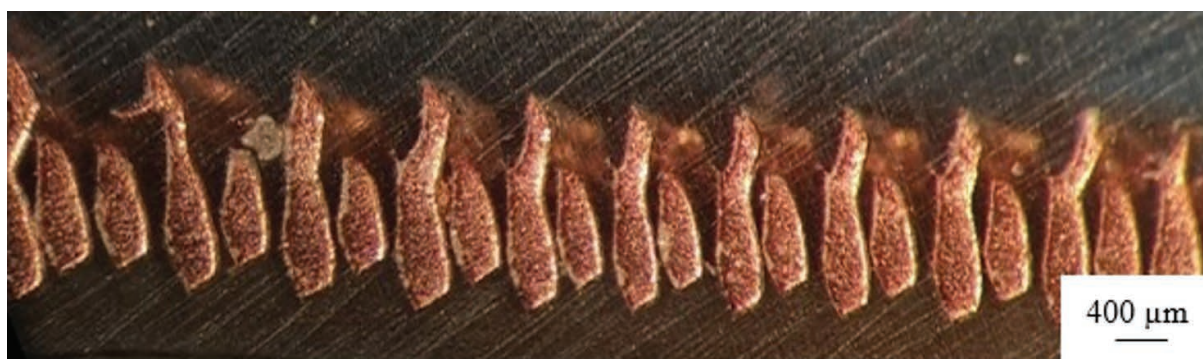
Группа «4» – нерегулярные срывы (рис. 13). Как и при обычном деформирующем резании, при малых по отношению к глубине резания подачах отмечена нестабильность процесса, характеризующаяся срывом некоторых или всех ребер с превышением предела прочности материала ребра под воздействием инструмента для ДР. Данная группа отнесена к области «D» на диаграмме (см. рис. 9) – «брак».



*a*



*б*



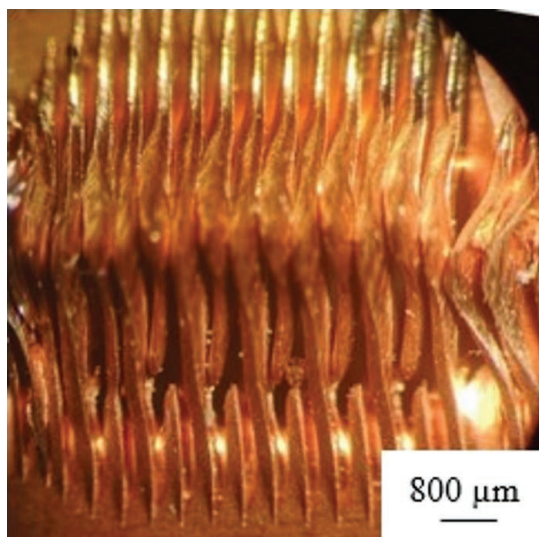
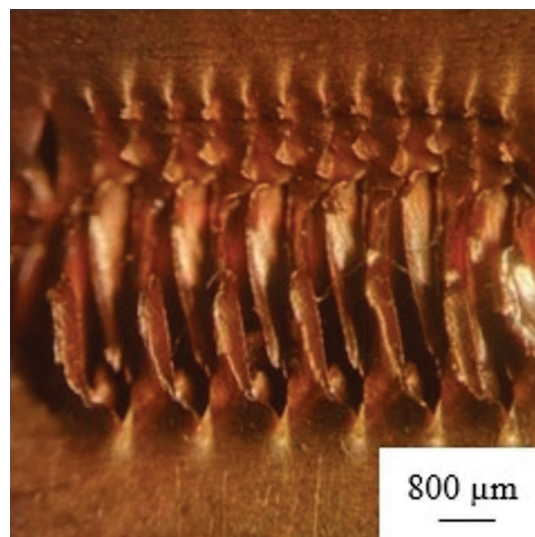
*в*

Рис. 11. «Двойникование»:

*a* – наружная сторона; *б* – внутренняя сторона; *в* – шлиф поперечного сечения щелей

Fig. 11. “Twinning” – pairwise convergence of slot walls:

*a* – outer side; *б* – inner side; *в* – slots cross section

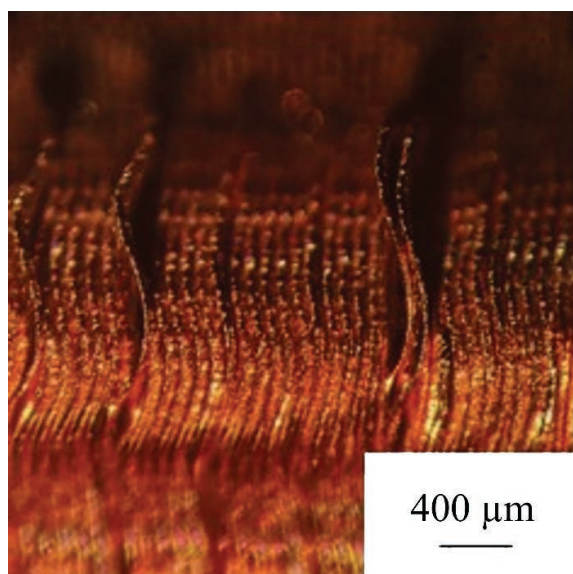
*a**б*

*Рис. 12. Срыв через одно ребро:*

*a* – наружная сторона; *б* – внутренняя сторона

*Fig. 12. Stripping of every second slot wall:*

*a* – outer side; *б* – inner side



*Рис. 13. Нерегулярные срывы (наружная сторона)*

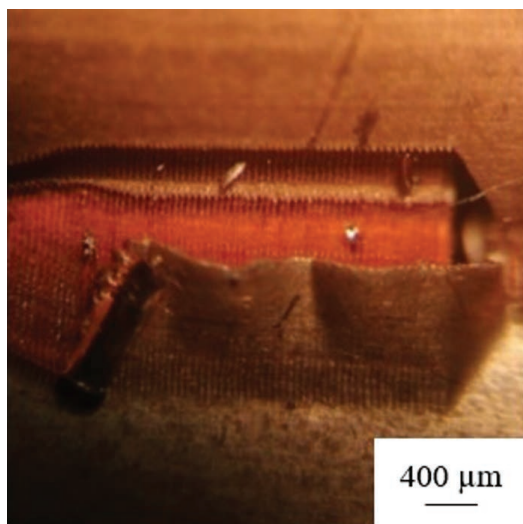
*Fig. 13. Non-regular stripping of slot walls (outer side)*

*Группа «5» – Равномерные щели с образованием юбки (рис. 14).* При подаче 0,2 мм/об и меньше был отмечен следующий эффект: при выходе инструмента из материала на внутренней стороне гофров заусенцы образуются не у каждого ребра по отдельности, а в виде единой ленты-фольги, отогнутой от материала инстру-

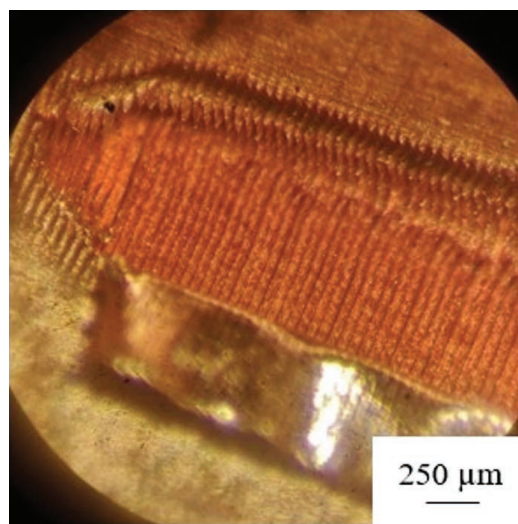
ментом и нависающей над рядом щелей. Эта лента далее будет условно называться «юбкой». Образование юбки может быть обусловлено свойствами поверхностного слоя материала и требует дальнейшего изучения.

При образовании юбки эффектов «двойнико-вания» не наблюдается, щели имеют визуальную равномерную ширину. Кроме того, при отгибании (см. рис. 14) и удалении юбки механически под ней обнаруживается щелевая структура, отличающаяся большей чистотой и отсутствием заусенцев по сравнению с группой «1», где также получались равномерные щели, но без образования юбки. Как следствие, группа результатов «5» отнесена к области «С» на диаграмме (см. рис. 9), которую можно охарактеризовать как область потенциально пригодных для задач фильтрации структур наравне с областью «А».

*Группа «6» – Щели с частично нераскрывшейся юбкой (рис. 15).* При наименьшей из рассмотренных подач – 0,05 мм/об – было отмечено образование «юбки» сразу же при достижении минимальной глубины резания, достаточной для сквозного прорезания гофра. При таких малых глубинах резания «юбка» частично сохраняет связь с материалом по обеим сторонам гофра, что затрудняет ее удаление и свободное прохождение фильтруемой среды через щели. Тем не



*a*



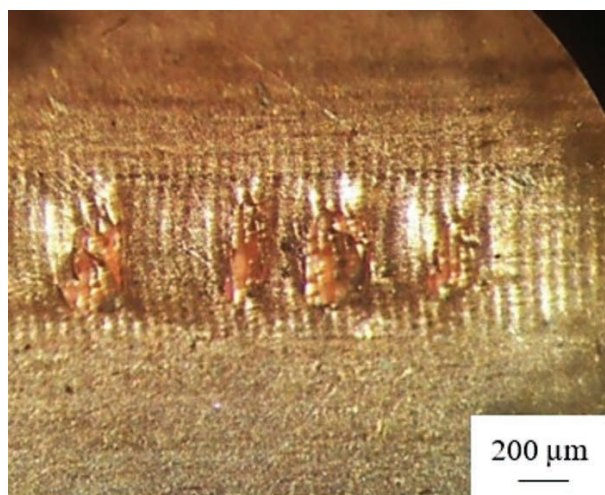
*б*

*Рис. 14.* Равномерные щели с образованием юбки:

*a* – вид юбки после прорезания щелей; *б* – юбка отогнута в сторону.

*Fig. 14.* Uniform slots with a continuous burr (“skirt”) formed:

*a* – view on the skirt after cutting through slits, *б* – the skirt is bent aside



*Рис. 15.* Щели с частично нераскрывшейся юбкой

*Fig. 15.* Slots with a skirt opened incompletely

менее, так как структура щелей равномерна и теоретическая возможность удаления юбки сохраняется, данная группа также отнесена к области «С» на диаграмме.

Распределение полученных результатов показало, что в интервале подач 0,25...0,4 мм/об сохраняется известная для деформирующего резания закономерность: с увеличением глубины резания при достижении определенного от-

ношения  $t/S$  наблюдается дестабилизация процесса ДР и проявление нежелательных эффектов (дублеты, триплеты, срывы), причем чем больше подача  $S$ , тем больше максимальная глубина резания  $t_{\max}$ , при которой стабильность процесса сохраняется. Однако отмеченные при подаче 0,4 мм/об срывы имеют регулярный попарный характер. Это может рассматриваться как предельный случай попарного группирования ребер, наблюдающегося при меньших подачах.

При подачах 0,1...0,2 мм/об с увеличением глубины резания (см. рис. 9 и 16) наблюдается переход от равномерных щелей (группа «1») к группированию ребер без срывов (группа «2»), а затем с началом образования «юбки» щели снова приобретают равномерную структуру (группа «5»).

Такая закономерность обнаружена впервые и может объясняться особенностями образования заусенцев с углом выхода вершины инструмента из материала, на который непосредственно влияет глубина резания. В частности, наличие заусенца только на одном из двух ребер в дублетах и на одном из трех ребер в триплетах (см. рис. 12 и рис. 16) может быть результатом притягивания соседних ребер общим заусенцем и последующего отрыва заусенца от всех ребер, кроме одного.

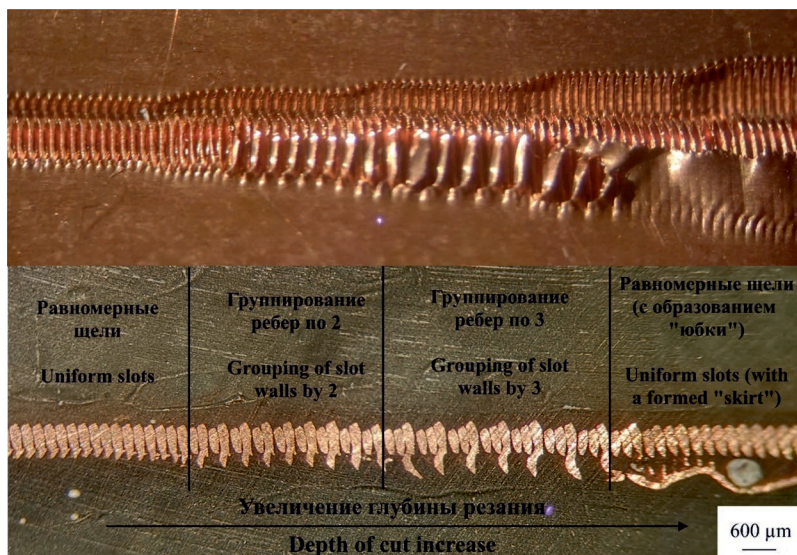


Рис. 16. Изменение получаемой структуры с увеличением глубины резания

Fig. 16. Evolution of the structures obtained with depth of cut increase

В интервале подач 0,06...0,08 мм/об участок «двойникования» отсутствует, с увеличением глубины наблюдается переход напрямую от равномерных щелей (группа «1») к равномерным щелям с образованием «юбки» (группа «5»), а при подаче 0,05 мм/об отсутствует и участок группы «1». Это свидетельствует о том, что меньшие значения подачи способствуют образованию общего заусенца для всего ряда щелей – «юбки». Данное обстоятельство может оказаться чрезвычайно благоприятным для получения структур высокой тонкости фильтрации, так как меньшие значения подачи соответствуют меньшим значениям ширины щелевого зазора (см. вышеприведенную формулу). Кроме того, как было отмечено, щели, находящиеся под «юбкой», отличаются высокой чистотой и отсутствием индивидуальных заусенцев, «юбка» отгибается от щелей механически как единое целое (см. рис. 14), и ее удаление может оказаться более простой задачей, чем удаление индивидуальных заусенцев.

В дальнейшем планируется проверить данные предположения посредством моделирования процесса прорезания щелей и дополнительных экспериментов с различными профилями гофров, а также исследовать возможности удаления «юбок», в частности пропуская мощ-

ного потока фильтрующей среды либо галтовкой.

Наименьшая подача, при которой были получены равномерные щели (с образованием юбки), 0,05 мм/об. Этой подаче согласно вышеприведенной формуле соответствует ширина щелей 19 мкм.

## Выводы

В интервале подач 0,2...0,4 мм/об с увеличением глубины резания наблюдается переход от равномерных щелевых структур (область «А») к области нежелательного группирования ребер с увеличением каждой второй или каждой третьей щели (область «В»), причем чем больше подача, тем больше максимальная глубина резания, при которой сохраняются равномерные щели.

В каждой из этих групп отмечено образование заусенцев с внутренней стороны щелей. Заусенцы в щелевом зазоре потенциально ухудшают эксплуатационные характеристики фильтров и создают опасность засорения фильтрата при срыве заусенцев. При меньших подачах (до 0,2 мм/об включительно) при дальнейшем увеличении глубины резания достигается вторая область потенциально пригодных для задач фильтрации структур – область «С», соответствующая образованию общего для всего ряда щелей заусенца – «юбки» на внутренней стороне гофра, при котором щелевая структура вновь становится равномерной. При образовании «юбки» отсутствуют индивидуальные заусенцы для каждой щели, форма щелей более чистая. С уменьшением подачи уменьшается ширина получаемых щелей. При этом наименьшая подача, при которой получены равномерные щели составляет 0,05 мм/об, что соответствует ширине щелей 19 мкм. В дальнейшем планируется провести аналогичные эксперименты с различными материалами при изменении геометрических параметров инструмента для ДР. Установление причин образования «юбок», выбор способа их удаления, а также наблюдаемого эффекта группирования ребер требуют дополнительных исследований.

### Список литературы

1. Tarleton E.S. Progress in filtration and separation. – Elsevier Science and Technology, 2018. – 698 p. – ISBN 9780081013939. – ISBN 0081013930.
2. Matanović D., Čikeš M., Moslavac B. Sand control in well construction and operation. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. – 200 p. – ISBN 978-3-642-25613-4. – DOI: 10.1007/978-3-642-25614-1.
3. Experimental evaluation of metal foam for sand control / F. Deng, X. Li, L. He, Y. Feng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 176. – P. 1152–1160. – DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.087.
4. Purchas D., Sutherland K. Handbook of filter media. – 2nd ed. – Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2002. – 572 p. – ISBN 9781856173759.
5. Kumar J., Galyadav M., Srivastava S. Performance and backwashing efficiency of screen, disc and sand filters in micro-irrigation systems // Trends in Biosciences. – 2017. – Vol. 10 (12). – P. 2172–2178. – URL: [http://trendsinsciencesjournal.com/upload/13-7477\\_Jagdish\\_Kumar.pdf](http://trendsinsciencesjournal.com/upload/13-7477_Jagdish_Kumar.pdf) (accessed: 20.10.2021).
6. Sparks T., Chase G. Filters and filtration handbook. – 6th ed. – Boston, MA: Elsevier, 2015. – 444 p. – ISBN 9780080993966. – DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.
7. Tarleton S., Wakeman R. Solid/liquid separation: scale-up of industrial equipment. – Elsevier Science, 2011. – 743 p. – ISBN 9780080551289.
8. Perlmutter B. Solid-liquid filtration: practical guides in chemical engineering. – Elsevier Science, 2015. – 211 p. – ISBN 9780128030547.
9. Solid-liquid separation / ed. by L. Svarovsky. – 4th ed. – Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. – 554 p. – (Chemical Engineering Series). – ISBN 9780750645683.
10. Smith D., Graciano C., Martínez G. Expanded metal: A review of manufacturing, applications and structural performance // Thin-Walled Structures. – 2021. – Vol. 160. – P. 107371. – DOI: 10.1016/j.tws.2020.107371.
11. Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. – М.: Техносфера, 2013. – 695 с. – ISBN 9785948363394.
12. Серебренникий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование. – СПб.: Лань, 2013. – 351 с. – ISBN 9785811414239.
13. European Patent EP1516150, МКИ F 28 F1/42; B21C37/20. Heat transfer tube and method of and tool for manufacturing the same / P. Thors, N. Zoubkov. – Заявл. 10.06.02; опубл. 23.03.05. – 40 p.
14. Зубков Н.Н. Растяжные титановые сетки на основе деформирующего резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 41–53. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-41-53.
15. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of slotted polymer tubes by deformational cutting // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, N 12. – P. 1231–1233. – DOI: 10.3103/S1068798X10120117.
16. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2016. – Vol. 138, iss. 1. – Art. 011007. – DOI: 10.1115/1.4030827.
17. Zubkov N.N., Vasil'ev V.A. Filtering elements of a new design and equipment for their manufacture // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60, N 5–6. – P. 547–554. – DOI: 10.1007/s11015-016-0329-0.
18. Бузаев Д.А. Получение щелевых фильтроэлементов на основе металлических труб круглого сечения // Будущее машиностроения России: однанадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием), 24–27 сентября 2018 г.: сборник докладов / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – С. 15–18.
19. Паришин С.В. Процессы и машины для изготовления профильных труб. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. – 356 с. – ISBN 5230064986.
20. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool-workpiece interaction in deformational cutting // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, N 3. – P. 209–212. – DOI: 10.3103/S1068798X16030217.
21. Зубков Н.Н. Многофункциональная технология увеличения площади поверхности для повышения теплообменных и технологических свойств деталей // Полет. – 2003. – № 3. – С. 41–46.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

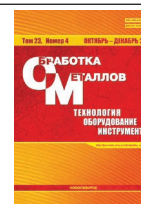
© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science





Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Influence of the parameters of deforming cutting on the features of the resulting slotted filter structures

Dmitry Buzaev <sup>a,\*</sup>, Nikolay Zubkov <sup>b</sup>

Bauman Moscow State Technical University, 5<sup>th</sup> Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7258-7379>,  [dm.buzaev@bmstu.ru](mailto:dm.buzaev@bmstu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3757-1299>,  [zoubkovn@bmstu.ru](mailto:zoubkovn@bmstu.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 09 August 2021

Revised: 31 August 2021

Accepted: 16 October 2021

Available online: 15 December 2021

##### Keywords:

Filters  
 Filtration  
 Solid-liquid separation  
 Filtering tubes  
 Slot filters  
 Regenerating filters  
 Deforming cutting

#### ABSTRACT

**Introduction.** Slot filters are in demand in petrochemical, machine-building, food, mining and other industries. *DC* is an edge cutting machining method based on undercutting and plastic deformation of the workpiece's surface layer without its removal in the form of chip. *DC* stands out from the other slot structure forming methods for its capability of obtaining fine filters (slot width upwards of 20 μm) while maintaining relatively high productivity rate and being waste-free. Nevertheless, patterns of through slots cutting by means of *DC* had virtually not been investigated previously. **The purpose of the work** is to establish the influence of the main parameters of deformational cutting, namely feed and depth of cut, on features of through slots obtained, as well as identifying combinations of parameters that ensure the production of structures suitable for filtration. **Method of investigation** consisted of experiments on through-cutting of corrugations stamped on copper strips and a visual analysis of the structures obtained. Cutting through the corrugations by *DC* was conducted on a lathe while using a special attachment – a barrel which workpiece corrugated strips were wrapped around and fixed on with tension. **Results and discussion.** The resulting typical structures obtained under different combinations of depth of cut and feed are systemized and divided into the following groups: “0” – the absence of the through cut; “1” – uniform slots; “2” – “twinning” (pairwise convergence of slot walls), “3” – stripping of every second slot wall; “4” – non-regular or complete stripping of slot walls; “5” – uniform slots with a continuous burr (“skirt”) formed along the slot row on the internal side of the corrugation; “6” – uniform slots with a “skirt” opened incompletely. In the range of feeds 0.2 ... 0.4 mm/rev with increasing cutting depth, there is a transition from structures of group “1” to structures of group “2”, and the greater the feed, the greater the maximum depth of cut, at which uniform slots remain. Group “1” is assigned to the area of structures suitable for filtration applications, although it is characterized by the formation of individual burrs on the inner side of each slot. At lower feeds (up to 0.2 mm/rev) with further increase of the depth of cut another group of structures potentially suitable for filtering purposes is reached: groups “5” and “6”. With the “skirt” formed, individual burrs next to each slots are absent, and the shape of slots is cleaner. With a decrease in feed, the width of the resulting slots decreases. The least tool feed value, at which uniform slots are obtained, is 0.05 mm/rev which corresponds to 19 μm slot width. Establishing the causes of “twinning” and the formation of “skirts” requires further investigation.

**For citation:** Buzaev D.A., Zubkov N.N. Influence of the parameters of deforming cutting on the features of the resulting slotted filter structures. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 33–46. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-33-46. (In Russian).

#### References

1. Tarleton E.S. *Progress in filtration and separation*. Elsevier Science and Technology, 2018. 698 p. ISBN 9780081013939. ISBN 0081013930.
2. Matanović D., Čikeš M., Moslavac B. *Sand control in well construction and operation*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012. 200 p. ISBN 9783642256134. DOI: 10.1007/978-3-642-25614-1.
3. Deng F., Li X., He L., Feng Y. Experimental evaluation of metal foam for sand control. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 176, pp. 1152–1160. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.087.

##### \* Corresponding author

Buzaev Dmitry A., Assistant  
 Bauman Moscow State Technical University,  
 5 2nd Baumanskaya Str.,  
 105005, Moscow, Russian Federation  
 Tel.: +7 (903) 679-96-59, e-mail: [dm.buzaev@bmstu.ru](mailto:dm.buzaev@bmstu.ru)

4. Purchas D., Sutherland K. *Handbook of filter media*. 2nd ed. Oxford, Elsevier Advanced Technology, 2002. 572 p. ISBN 9781856173759.
5. Kumar J., Galyadav M., Srivastava S. Performance and backwashing efficiency of screen, disc and sand filters in micro-irrigation systems. *Trends in Biosciences*, 2017, vol. 10 (12), pp. 2172–2178. Available at: [http://trends-in-biosciencesjournal.com/upload/13-7477\\_\(Jagdish\\_Kumar\).pdf](http://trends-in-biosciencesjournal.com/upload/13-7477_(Jagdish_Kumar).pdf) (accessed 20.10.2021).
6. Sparks T., Chase G. *Filters and filtration handbook*. 6th ed. Boston, MA, Elsevier, 2015. 444 p. ISBN 978-0-08-099396-6. DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.
7. Tarleton S., Wakeman R. *Solid/liquid separation: scale-up of industrial equipment*. Elsevier Science, 2011. 743 p. ISBN 9780080551289.
8. Perlmutter B. *Solid-liquid filtration: practical guides in chemical engineering*. Elsevier Science, 2015. 211 p. ISBN 9780128030547.
9. Svarovsky L., ed. *Solid-Liquid Separation*. 4th ed. *Chemical Engineering Series*. Oxford, Boston, Butterworth-Heinemann, 2000. 554 p. ISBN 9780750645683.
10. Smith D., Graciano C., Martínez G. Expanded metal: A review of manufacturing, applications and structural performance. *Thin-Walled Structures*, 2021, vol. 160, p. 107371. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107371.
11. Vaks E.D., Milen'kii M.N., Saprykin L.G. *Praktika pretsizionnoi lazernoi obrabotki* [Practice of precision laser treatment]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013. 695 p. ISBN 9785948363394.
12. Serebrenitskii P.P. *Sovremennye elektroerozionnye tekhnologii i oborudovanie* [Modern electrical discharge technologies and equipment]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013. 351 p. ISBN 9785811414239.
13. Thors P., Zoubkov N. *Heat transfer tube and method of and tool for manufacturing the same*. European Patent, no. EP1516150, 2005.
14. Zubkov N.N. Rastyazhnye titanovye setki na osnove deformiruyushchego rezaniya [Expanded titanium meshes based on deformational cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 41–53. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-41-53.
15. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of slotted polymer tubes by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1231–1233. DOI: 10.3103/S1068798X10120117.
16. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, vol. 138, iss. 1, art. 011007. DOI: 10.1115/1.4030827.
17. Zubkov N.N., Vasil'ev V.A. Filtering elements of a new design and equipment for their manufacture. *Metallurgist*, 2016, vol. 60, no. 5–6, pp. 547–554. DOI: 10.1007/s11015-016-0329-0.
18. Buzaev D.A. [Obtaining of slot-type filtering elements from metal pipes of circular section]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii: odinnadtsataya vserossiiskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Proceedings 11<sup>th</sup> All-Russian conference of young scientists and specialists “Future of mechanical engineering of Russia”], 24–27 September 2018. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018, pp. 15–18. (In Russian).
19. Parshin S.V. *Protsessy i mashiny dlya izgotovleniya profil'nykh trub* [Processes and machines for profile tubes production]. Ekaterinburg, UGTU-UPi Publ., 2006. 356 p. ISBN 5230064986.
20. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool–workpiece interaction in deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 209–212. DOI: 10.3103/S1068798X16030217.
21. Zubkov N.N. Mnogofunktsional'naya tekhnologiya uvelicheniya ploshchadi poverkhnosti dlya povysheniya teploobmennyykh i tekhnologicheskikh svoystv detalei [A multifunctional technology of the surface area increase to improve heat exchange and technological properties of parts]. *Polet = Polyot*, 2003, no. 3, pp. 41–46.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).