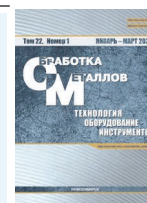




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Растяжные титановые сетки на основе деформирующего резания

Николай Зубков *

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

 <https://orcid.org/0000-0003-3757-1299>,  zoubkovn@bmsu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.044

История статьи:

Поступила: 27 декабря 2019

Рецензирование: 20 января 2020

Принята к печати: 14 февраля 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:

Растяжные сетки
Деформирующее резание
Герниопластика
Фильтрация
Фторопласт
Титан

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (Грант № 9.5617.2017 / ВУ).

Благодарности

Автор выражает благодарность С.Ю. Коровушкину за помощь в проведении и обработке результатов экспериментов.

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из областей использования деформирующего резания (ДР) является получение сеток из тонколистовых материалов. Принцип их получения состоит в двустороннем оребрении листа во взаимно перпендикулярных направлениях с глубиной ДР более половины толщины листа. Существенным недостатком таких сеток является малая величина живого сечения (отношение суммарной площади отверстий к площади сетки). Одной из перспективных областей использования сеток, получаемых ДР, является их использование в герниопластике в качестве титановых имплантатов для лечения грыж и армирования костных и мягких тканей. Для имплантатов необходимо живое сечение сетки более 60 %, высокая податливость пластическим деформациям и большая удельная площадь поверхности для удержания прорастающих в имплантат тканей. В статье метод ДР рассматривается как альтернатива существующим титановым плетеным сеткам-имплантатам, имеющим крайне высокую стоимость. **Цель работы.** Изучение основных закономерностей получения методом ДР заготовок для сеток, особенностей их растягивания и анализ получаемых форм и размеров ячеек. **В работе исследовано** двустороннее оребрение тонколистовых заготовок из титана ВТ1-00 с несовпадающим направлением оребрения противоположных сторон листа в диапазоне углов скрещивания $1,3^\circ \dots 10^\circ$ с варьированием угла подрезания заготовки и шага оребрения. Проведен анализ механики растяжения при получении ромбической, шестигранной и параллелограммной формы ячеек. **Результаты и обсуждение.** Установлен диапазон шагов оребрения и углов скрещивания, обеспечивающих стабильность процесса ДР и растягивания заготовки. На форму ячейки основное влияние оказывает длина связи ребер, полученных на противоположных сторонах листа. Увеличение длины связи при уменьшении угла скрещивания приводит к переходу формы ячейки от ромбической к шестигранной. Ячейка в виде параллелограмма свойственна ребрам противоположных сторон, имеющим отличия в изгибной прочности. **Выводы.** Метод деформирующего резания является альтернативным вариантом сквозного прорезания тонколистовых металлических и полимерных заготовок для их последующего растяжения с целью получения сеток. По сравнению с просечными и ткаными сетками сетки, полученные на основе ДР, имеют большую площадь поверхности и повышенную способность к их пластическому деформированию. Обосновано получение форм ячеек ромбической, шестигранной и параллелограммной формы. Управление формой ячейки получаемой растяжной сетки осуществляется выбором угла направления ребер и шагом оребрения на противоположных сторонах заготовки. Наибольший размер ячейки и живое сечение сетки обеспечивают сетки с гексагональными ячейками при углах скрещивания направления ребер на противоположных сторонах заготовки менее 3° .

Для цитирования: 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.

Введение

Метод деформирующего резания [1] основан на подрезании поверхностных слоев заготовки под углом подрезания φ и их последующем

деформировании, при этом подрезанный слой остается прикрепленным к заготовке по своей узкой стороне и образует макрорельеф в виде оребрения (рис. 1, а). На поверхности заготовки формируется рельеф в виде чередующихся ребер, которые представляют собой стружку, не отделившуюся от основы по своей узкой стороне. Характерные параметры оребрения составляют (рис. 1, б): шаг оребрения $p = 0,05 \dots 2,0$ мм, высота ребер h до семи шагов оребрения для меди и до пяти шагов оребрения для пластичных

*Адрес для переписки

Зубков Николай Николаевич, д.т.н., профессор,
Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
105005, г. Москва, Россия
Тел. раб.: +7-499-263-6486,
Тел. моб.: +7-916-607-7948, e-mail: zoubkovn@bmsu.ru

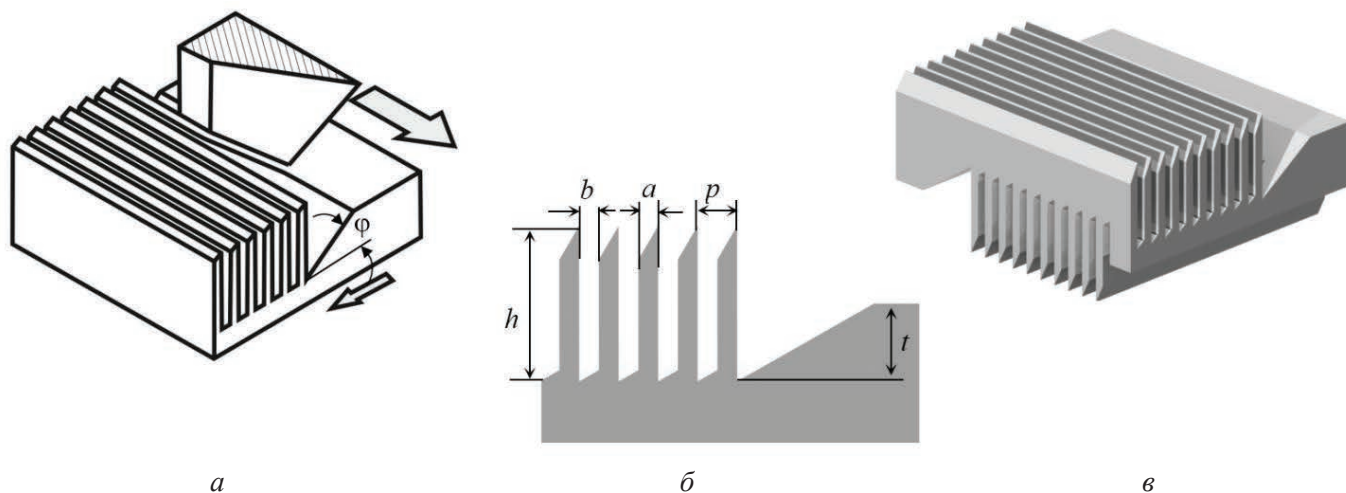


Рис. 1. Принцип деформирующего резания (а); параметры получаемого оребрения (б); схема сетки на основе двустороннего оребрения противоположных сторон листа (в)

Fig. 1. Concept of deformational cutting (a); fin parameters (b); concept of mesh based on the both side sheet finning (c)

сталей, ширина межреберного зазора b составляет от единиц микрометров до 1,0 мм, наклон ребер до 45° . Ограничением использования метода ДР являются показатели пластичности и твердости обрабатываемого материала. Оребрение устойчиво получается на материалах с относительным удлинением более 18 % и твердостью менее HV 220.

В настоящее время метод ДР используется в различных областях производства. Основной является область интенсификации теплообмена, например, для оребрения труб теплообменных аппаратов [2], изготовления поверхностей кипения и капиллярных структур тепловых труб [3]. Метод ДР может быть также использован для создания электрических соединителей [4], упрочнения поверхностей [5], поверхностной закалки [6], нарезания резьб [7], формирования штырьковых теплообменных структур [8] и т. д.

Одной из областей использования деформирующего резания (ДР) является получение сеток из листовых материалов (рис. 1, в). Принцип их получения состоит в двустороннем оребрении листа во взаимно перпендикулярных направлениях с глубиной ДР более половины толщины листа [9]. На титане VT1-00 получены металлические сетки габаритом 400×400 мм с размером прямоугольных отверстий 20×40 мкм с количеством отверстий до 100 на квадратный миллиметр (рис. 2).



Рис. 2. Микросетка, полученная ДР из титанового листа VT1-00, толщиной 0,3 мм. Размер ячейки 20×40 мкм

Fig. 2. Micromesh obtained from titanium sheet VT1-00 with a thickness of 0.3 mm. Cell size $20 \times 40 \mu\text{m}$

Существенным недостатком таких сеток является малая величина живого сечения, под которым понимается отношение суммарной площади отверстий к площади сетки. Это обусловлено тем, что для ДР имеется ограничение по отношению толщины ребра a к шагу оребрения p (рис. 1, б). Для вертикального оребрения толщина ребра определяется углом подрезания ϕ и шагом оребрения $a = p \sin \phi$, величина межреберного зазора $b = p(1 - \sin \phi)$. Для меди, алюминия и титана, как более пластичных металлов, $a/p > 35\%$, для медных сплавов и коррозионно-стойких сталей $a/p > 0,6\%$. Следует учитывать,

что стабильность процесса ДР существенно зависит от соотношения a/p . Чем оно ниже, тем выше вероятность срыва отдельных ребер в виде стружки, что недопустимо для фильтрующих сеток. При получении сеток с перпендикулярным направлением оребрения противоположных сторон и вертикальными ребрами живое сечение $\Delta_{\max}$ равно произведению предельных значений отношений ширины межреберного зазора к шагу для оребрений, получаемых на обеих сторонах листовой заготовки:

$$\Delta_{\max} = \left(\frac{b_1}{p_1} \right)_{\max} \left(\frac{b_2}{p_2} \right)_{\max} = \left[1 - \left(\frac{a_1}{p_1} \right)_{\min} \right] \left[1 - \left(\frac{a_2}{p_2} \right)_{\min} \right],$$

где индексы 1 и 2 обозначают параметры оребрения противоположных сторон листа.

Таким образом, для более пластичных металлов предельное живое сечение $\Delta_{\max} = 42\%$, для сталей $\Delta_{\max} = 16\%$.

Одной из перспективных областей использования сеток, получаемых ДР, является их применение в герниопластике в качестве титановых имплантатов для лечения грыж и армирования мягких и костных тканей. Несомненно, сетки должны изготавливаться из биосовместимых материалов, одним из которых является титан [10, 11]. В настоящее время для герниопластики используются плетеные сетки из титановой микропроволоки диаметром 40...60 мкм, так называемый «титановый шелк» [12, 13], который имеет очень высокую стоимость (около \$300 за сетку размером 60×90 мм).

Для герниопластики живое сечение даже $\Delta = 42\%$ является крайне малым для прорастания тканей в структуру сетки. Вторым недостатком сеток с перпендикулярным направлением оребрения сторон листа является их высокая жесткость и низкая податливость пластическим деформациям. Для успешного приживания имплантата имеет значение не только высокая биосовместимость, но и относительная эластичность материала, используемого для длительной имплантации, а также высокая удельная площадь поверхности имплантата, необходимая для удержания прорастающих в имплантат тканей.

Обобщая сказанное выше, можно сформулировать следующие требования для титановых сеток, применяемых в герниопластике. Марка материала – ВТ1-00, толщина сетки 0,3...0,6 мм, размер ячейки 0,1...3,0 мм, живое сечение $\Delta > 60\%$, габариты до 60×90 мм.

В статье рассматривается вариант получения растяжных сеток на основе заготовок, получаемых ДР и устраняющих вышеописанные недостатки. Это осуществляется за счет оребрения противоположных сторон листовой заготовки под углом не равным 90°, что дает соединение зазоров в виде вытянутых ромбов, которые затем растягиваются, тем самым значительно увеличивают живое сечение сетки (рис. 3, а). Зона растяжения показана на рис. 3, б). Пример получаемой сетки приведен на рис. 3, в. Процесс растяжения сеток показан внизу web-страницы: <http://defrez.ru/mikrosetky.htm>.

Растяжная сетка представляет собой совокупность ребер, причем толщина ребра, в отличие от нерастяжных сеток, значительно меньше линейного размера ячейки.

Первоначальные эксперименты показали неопределенность формы получаемых ячеек при растяжении, поэтому возникла задача получения управляемых форм и размеров ячеек. Целью статьи является моделирование и экспериментальная проверка процесса растяжения сеток из тонколистовых двусторонне-оребранных заготовок, получаемых ДР.

Растяжные металлические сетки были известны и ранее. Они нашли использование в качестве фильтров, сит, элементов конструкций, армирования бетона, декоративных элементов, поглотителей энергии и др. [14–16]. По удельной прочности на растяжение такие сетки превосходят сплошной листовой материал [17]. Единственным способом их производства является сквозная просечка листа с последующим его растягиванием [18]. Механике растяжения просечных сеток в литературе уделено недостаточно внимания. В основном рассматривались особенности технологии растягивания заготовок из металлических и полимерных листовых материалов при получении сотовых конструкций [19, 20], которые неактуальны для растягивания заготовок, полученных ДР. В статье исследуются особенности растяжения сеток при альтернативном методе получения заготовок – двусторонне-оребрания листов методом ДР.

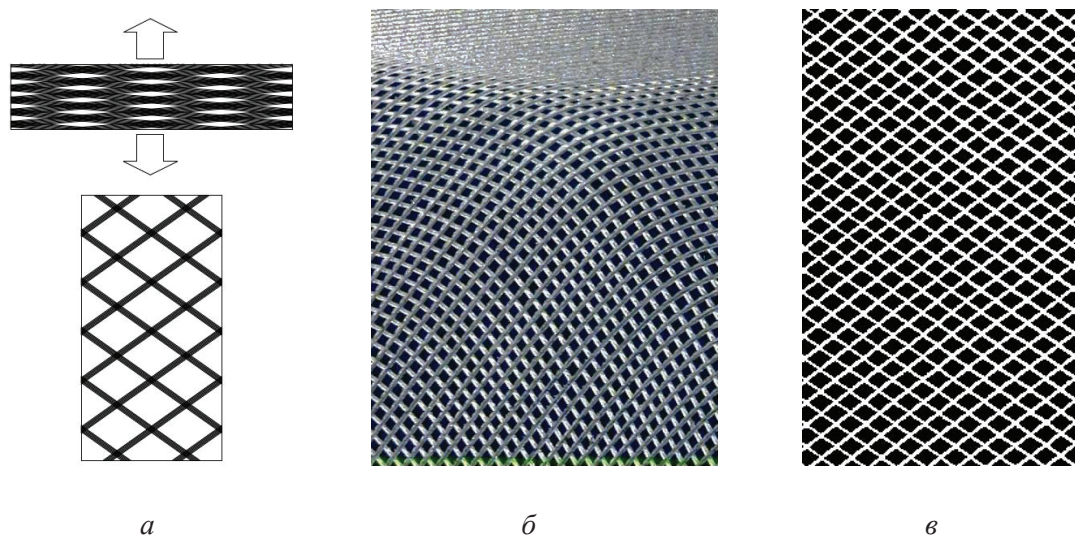


Рис. 3. Схема растяжения сетки (а); зона растяжения на сетке из серебра (б), фотография титановой сетки после растяжения (в)

Fig. 3. Scheme of mesh stretching (a); the stretching zone of silver mesh (b); photo of the titanium mesh after stretching (c)

Методика исследований

Для получения заготовок для растяжения использовался токарно-винторезный станок 16Б16КА. Полоса из титана ВТ1-00 толщиной 0,3 мм и шириной 40 мм натягивалась на специально изготовленный барабан диаметром $D = 165$ мм, имеющий возможность закрепления концов полосы и ее натяжения (рис. 4).

Обработка велась со скоростью ДР $v = 100$ м/мин. Глубина резания $t = 0,2$ мм при обработке обеих сторон полосы. Величина шага ребер варьирова-

лась от $p = 0,05 - 0,2$ мм. Угол скрещивания между направлениями оребрения противоположных сторон полосы изменяли в диапазоне от $\beta = 1,3^\circ \dots 10^\circ$. Оребрение первой стороны проводилось параллельно боковой стороне ленты (рис. 4, а). Затем лента переворачивалась и ее концы закреплялись со смещением на величину B (рис. 4, б). Угол скрещивания управлялся расчетом по выражению $\beta = \arctg(B / (\pi D - c))$, где c – ширина натяжной планки.

Растяжение сеток проводилось на сконструированном приспособлении, показанном на рис. 5.

Форма ячеек сеток фиксировалась цифровой приставкой к микроскопу с измерением геометрических параметров сеток: длин ребер и угловых параметров.

Результаты

Определяющими параметрами растяжных сеток являются характерный размер, форма ячейки и живое сечение сетки.

До растяжения ширина ячейки b_n равна межреберному зазору $b_n = S(1 - \sin \varphi)$. Из геометрических построений живое сечение заготовки для растяжения составит:

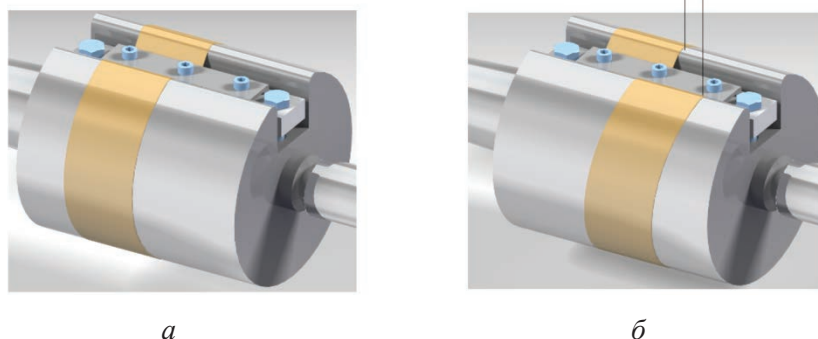
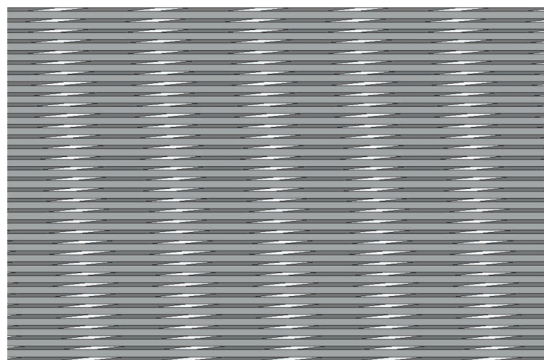


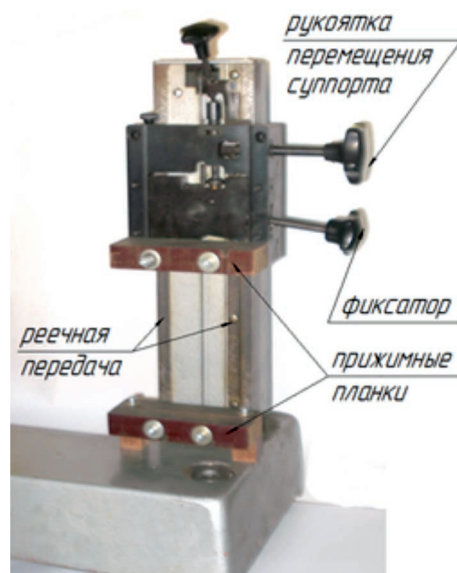
Рис. 4. Положение обрабатываемой ленты на барабане при оребрении ее противоположных сторон:

а – обработка первой стороны; б – обработка противоположной стороны

Fig. 4. Blank position on the drum for opposite sides finning: а – for first side finning; б – for opposite side finning



а



б

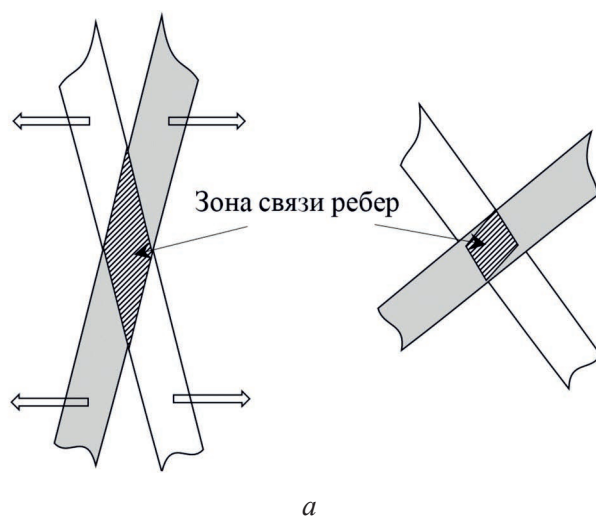
Рис. 5. Структура сетки до растяжения (а) и устройство растягивания сеток (б)

Fig. 5. Mesh structure before stretching (a) and device for mesh stretching (b)

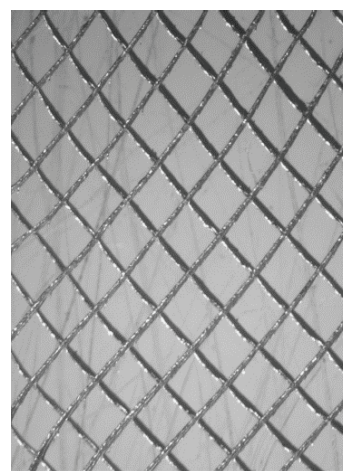
$$\Delta_{\text{и}} = \frac{S_{\text{отв}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{[p(1 - \sin \beta)]^2 [\operatorname{tg}(\beta/2) + \operatorname{tg}(90 - \beta)]}{p^2 [\operatorname{tg}(\beta/2) + \operatorname{tg}(90 - \beta)]}.$$

Геометрические характеристики сеток после растяжения рассчитывались из допущения о равенстве периметров центральных линий ребер до и после растяжения.

Ромбические ячейки получаются при относительно больших углах скрещивания β . Формируется так называемый пластический шарнир в узлах пересечения ребер. При этом происходит частичный срез связи ребер вокруг шарнира. Ребра, сформированные на противоположных сторонах заготовки, не изгибаются (рис. 6). Рациональной степенью растяжения для сеток с ромбической ячейкой является получение ее квадратной формы, обеспечивающей максимальное



а



б

Рис. 6. Формирование ромбических ячеек (а); сетка с ромбическими ячейками (б); угол скрещивания $\beta = 4^\circ$; шаг оребрения $p = 0,06$ мм

Fig. 6. Formation of rhombic cells (a); mesh with rhombic cells (b); crossing angle $\beta = 4^\circ$.
Fin pitch $p = 0.06$ mm

значение живого сечения сетки. При растяжении с переходом через квадратную форму ячейки становятся снова ромбическими с уменьшением живого сечения.

Гексагональная форма ячеек получается при большой протяженности связи ребер, характерной для малых углов скрещивания β (рис. 7) и одинаковой изгибной прочности ребер противоположных сторон сетки. При растяжении, несмотря на частичное отделение ребер друг от друга, связь ребер остается неразрушенной на значительной длине. Оба ребра изгибаются и образуют гексагональную ячейку.

Ячейка параллелограммной формы образуется при различной прочности ребер противоположных сторон сетки-заготовки. Менее прочные ребра частично теряют связь с более прочными ребрами и изгибаются. Более прочные ребра остаются прямыми (рис. 8).

Прочность ребра на изгиб зависит от момента сопротивления сечения ребра изгибу, который равен

$$W_x = \frac{ha^2}{6} = \frac{tp^2 \sin \varphi}{6},$$

где h и a – высота и толщина ребра.

Из формулы видно, что управлять изгибной прочностью ребра можно варьированием глубины ДР (t), шагом ребер p и углом подрезания φ .

Помимо трех основных форм ячеек также возможны другие промежуточные варианты форм с непрямолинейными сторонами ячейки, образование которых обусловлено неравномерным изгибом ребер.

В таблице представлены результаты экспериментов по получению растяжных сеток при варьировании угла скрещивания и шага оребрения.

Графики размера ячейки и живого сечения сетки после растяжения в зависимости от угла скрещивания и шага ребер показаны на рис. 9 и 10.

Обсуждение результатов

При больших углах скрещивания и малых шагах оребрения растяжение сетки приводит к формированию ромбических ячеек с частным случаем образования квадрата. Сетки с квадратной ячейкой имеют наибольшее живое сечение при прочих равных условиях.

Уменьшение угла скрещивания $\beta < 3^\circ$ приводит к образованию гексагональных ячеек для всех исследованных шагов оребрения.

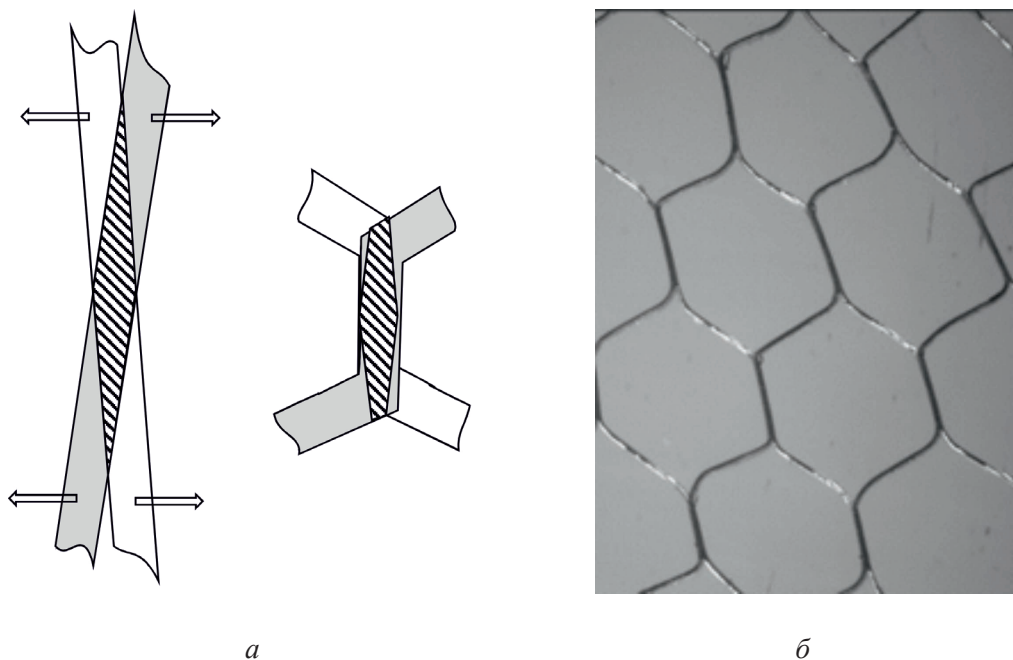


Рис. 7. Формирование гексагональных ячеек (а); сетка с гексагональными ячейками (б); угол скрещивания $\beta = 1,3^\circ$, шаг оребрения $p = 0,06$ мм

Fig. 7. Formation of hexagonal cells (a); mesh with hexagonal cells (b); the crossing angle $\beta = 1,3^\circ$, fin pitch $p = 0.06$ mm

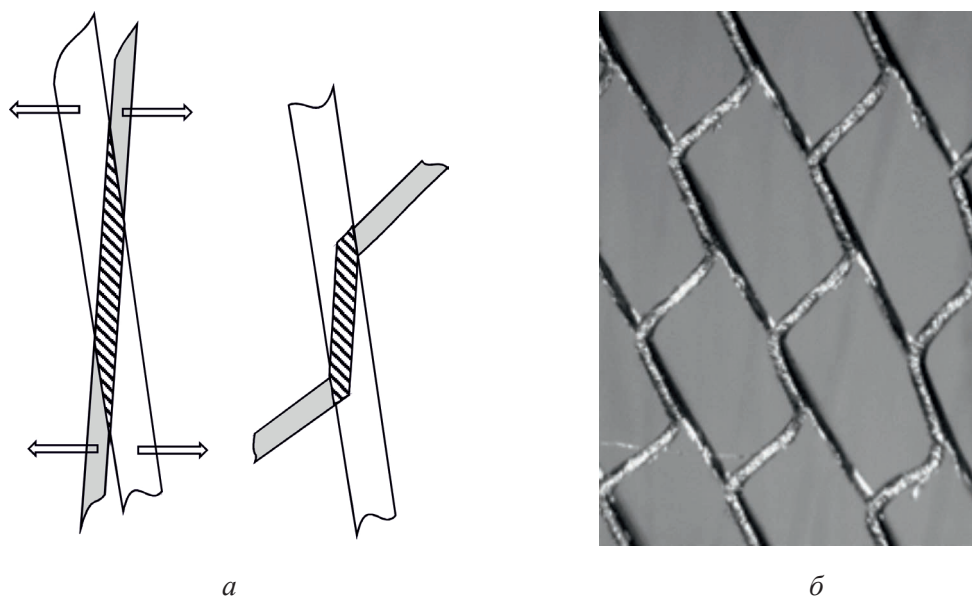
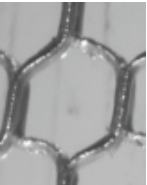
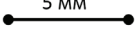
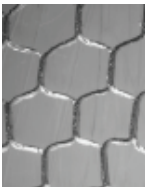
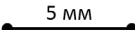


Рис. 8. Формирование параллелограммных ячеек (а); сетка с параллелограммными ячейками (б); угол скрещивания $\beta = 4^\circ$; шаг оребрения $p = 0,08$ мм для первой стороны и $p = 0,1$ мм для противоположной стороны

Fig. 8. The formation of parallelogram cells (a); mesh with parallelogram cells (б); the crossing angle $\beta = 4^\circ$; the fin pitch $p = 0.08$ mm for the first side and $p = 0.1$ mm for the opposite side

Сетки после растяжения заготовок с различным углом скрещивания и шага ребер

Meshes after stretching with blank different fin cross angle and fin pitch

Угол скрещивания	$p = 0,06$ мм	$p = 0,08$ мм	$p = 0,1$ мм	$p = 0,12$ мм	$p = 0,18$ мм
$\beta = 9^\circ$ 					
$\beta = 4^\circ$ 					
$\beta = 2,8^\circ$ 					
$\beta = 1,3^\circ$ 					

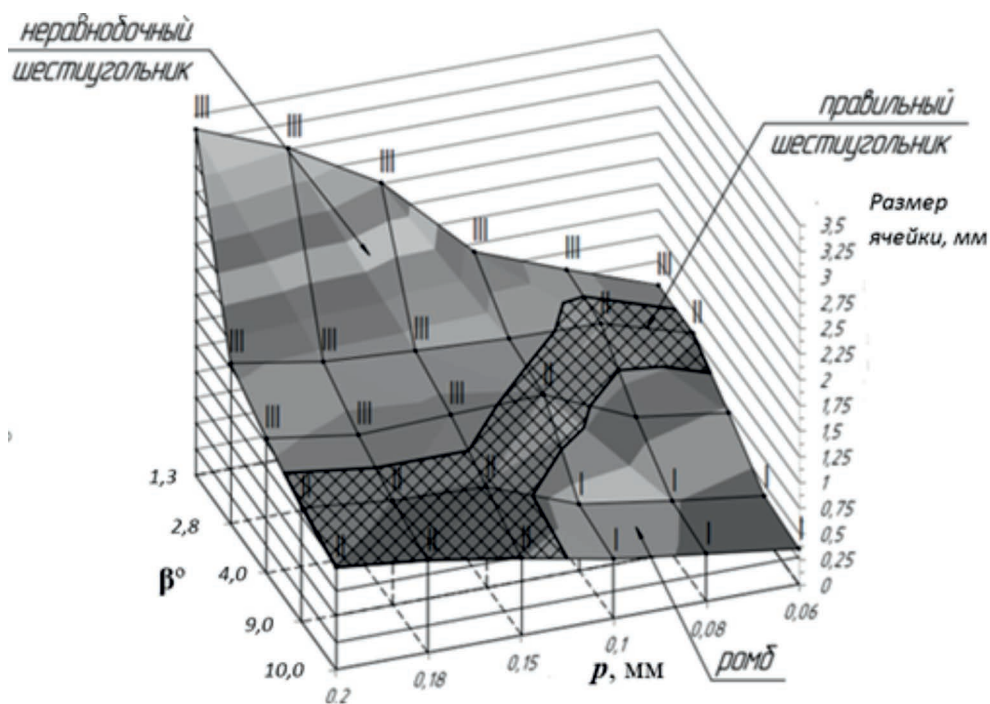


Рис. 9. Зависимость размера ячейки от угла скрещивания β и шага ребер p

Fig. 9. Cell size versus cross angle β and fin pitch p

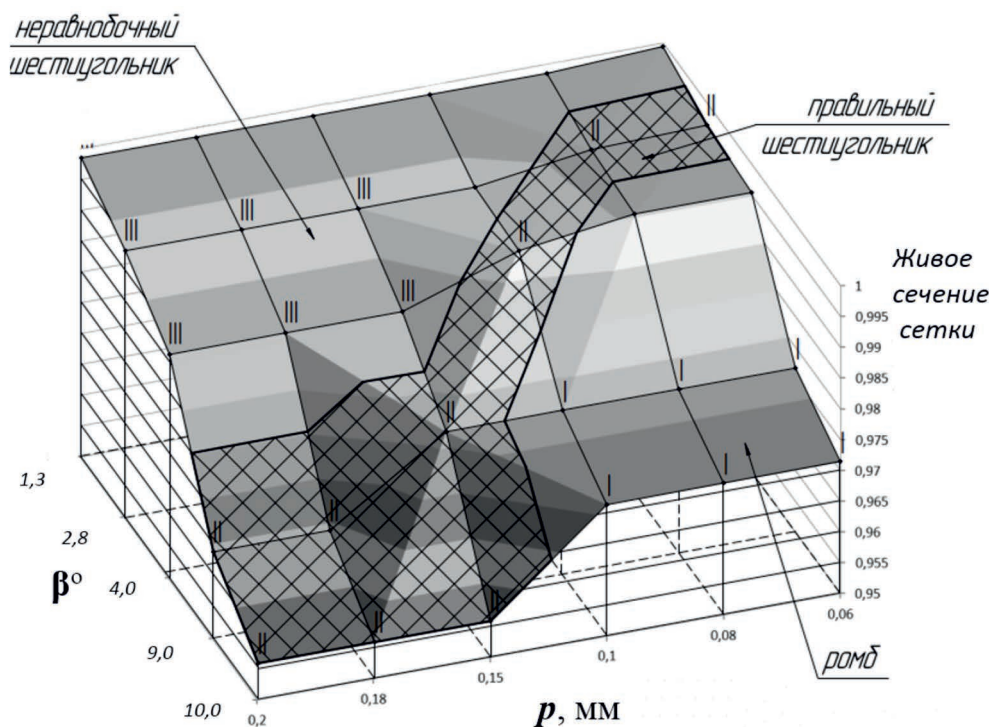


Рис. 10. Зависимость живого сечения сетки от угла скрещивания β и шага ребер p

Fig. 10. Effective screening area versus cross angle β and fin pitch p

Различная глубина резания t , шаг оребрения p или угол подрезания φ для противоположных сторон заготовки приводит к различной прочности и жесткости ребер, образованных на сторонах заготовки. При растяжении сетки более прочные и жесткие ребра остаются прямолинейными с изгибом менее прочных ребер. Форма образуемой ячейки – параллелограмм с частным случаем образования прямоугольной ячейки. Сетка имеет анизотропию свойств по жесткости в плоскости сетки.

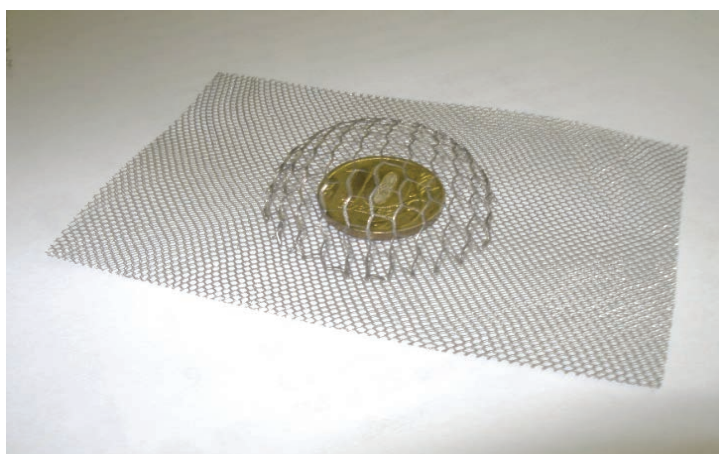
Проведен анализ сочетания стабильности получения оребрения и растяжения сеток. Оптимальный вариант следующий: глубина резания t одинакова для обеих сторон листа и составляет $2/3$ от толщины листа. Угол подрезания β и шаг оребрения p также должны быть одинаковы при обработке разных сторон. Из апробированных углов подрезания $\varphi = 30^\circ$, $\varphi = 42^\circ$ и $\varphi = 51^\circ$ угол подрезания $\varphi = 30^\circ$ не обеспечивает стабильности процесса ДР при малых шагах оребрения. Для резца с $\varphi = 30^\circ$ стабильность ДР теряется при шагах менее $0,2$ мм/об, особенно при обработке второй стороны. Для угла подрезания $\varphi = 42^\circ$ процесс устойчив для шагов ребер не менее $0,12$ мм. Угол подрезания $\varphi = 51^\circ$ обеспечивает стабильное оребрение при шагах до $0,06$ мм (межреберный зазор составляет 13 мкм). Шаг оребрения $p = 0,08$ мм обеспечивает не только стабильность ДР, но и стабильность растяжения

сетки для всех исследуемых углов скрещивания. Для $\varphi = 51^\circ$ заготовка растяжной сетки имеет живое сечение Δ всего 5% и ширину ячейки $b = 18$ мкм при любых углах встречи β , но при растягивании сетки с малыми углами встречи β живое сечение может быть увеличено до 99% с размером ячейки в несколько миллиметров.

По сравнению с ткаными сетками растяжные сетки на основе ДР имеют возможность пластического деформирования (рис. 11, а), что является важным условием их использования в герниопластике.

Для герниопластики важным является также удельная площадь поверхности используемой сетки. После оребрения поверхности на участке, соответствующем величине шага оребрения p , режущей кромкой резца образуются две новые поверхности: одна поверхность – на заготовке и в поперечном сечении соответствует ширине подрезания $m = t/\sin \varphi$, вторая поверхность – на боковой стороне ребра, высота h которого равна ширине подрезания $h = t/\sin \varphi$. Таким образом, добавив к длинам новых поверхностей величину исходной поверхности и разделив на величину шага оребрения p , может быть получен коэффициент увеличения площади поверхности после оребрения K_p :

$$K_p = 1 + \frac{2t}{p \sin \varphi}.$$



а



б

Рис. 11. Титановые растяжные сетки (а), фторопластовая (Ф4) растяжная сетка (б), полученные на основе двусторонне-оребранных тонколистовых заготовок

Fig. 11. Titanium stretching meshes (a), teflon stretching mesh (b), obtained on the basis of both-side finned thin-sheet blanks

Для одностороннего оребрения, например с режимами $p = 0,08$ мм, $t = 0,2$ мм и $\varphi = 51^\circ$, $K_p = 4,2$, что означает увеличение площади оребренной поверхности в 4,2 раза по сравнению с площадью исходной поверхности. Оребрение второй стороны листовой заготовки также увеличивает площадь поверхности в 4,2 раза, что суммарно дает увеличение площади поверхности заготовки после двустороннего ДР в 8,4 раза. По сравнению с проволочными сетками сетки, полученные ДР, имеют значительно большую площадь поверхности.

Для герниопластики перспективными также являются сетки из фторопласта Ф4, имеющие наивысшие показатели биосовместимости ввиду его абсолютной химической инертности. На рис. 11, б показана растяжная сетка из фторопласта Ф4, полученная на основе ДР.

Выводы

1. Метод деформирующего резания является альтернативным вариантом сквозного прорезания тонколистовых металлических и полимерных заготовок для их последующего растяжения с целью получения сеток большого живого сечения.

2. По сравнению с просечными и ткаными сетками сетки, полученные на основе ДР, имеют большую площадь поверхности и повышенную способность к их пластическому деформированию.

3. Обосновано получение форм ячеек ромбической, шестигранной и параллелограммной формы. Управление формой ячейки получаемой растяжной сетки осуществляется выбором угла направления ребер и шагом оребрения на противоположных сторонах заготовки.

4. Наибольший размер ячейки и живое сечение сетки обеспечивают сетки с гексагональными ячейками при углах скрещивания направления ребер на противоположных сторонах заготовки менее 3° .

Список литературы

1. Patent EP 0727269 B1. Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method / N.N. Zubkov, A.I. Ovchinnikov. – Publ. date 13.09.2000.
2. Ельчинов В.П., Митин Е.В. Новые нержавеющей кожухотрубные конденсаторы водяного охлаждения:

сочетание эффективности и надежности // Холодильный бизнес. – 2014. – № 1. – С. 16–22.

3. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe / A.A. Yakomaskin, V.N. Afanasiev, N.N. Zubkov, D.N. Morskoy // Journal of Heat Transfer. – 2013. – Vol. 135, iss. 10. – P. 101006. – DOI: 10.1115/1.4024502.

4. Novel electrical joints using deformation machining technology. Pt. 2. Experimental verification / L. Solovyeva, N. Zubkov, B. Lisowsky, A. Elmoursi // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 2, N 10. – P. 1718–1722. – DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2199755.

5. Шуляк Я.И. Силы резания при деформационном упрочнении аустенитной стали методом деформирующего резания // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – № 1. – С. 12–19. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-12-19.

6. Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В. Особенности закалочного деформирующего резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 35–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49.

7. Зубков Н.Н. Однопроходное формирование резьб на пластичных металлах деформирующим резанием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17.

8. Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L., Voinov S.A. Shaping of heat exchanger pins by deformational cutting // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, N 2. – P. 81–85. – DOI: 10.3103/S1068798X16020258.

9. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes // Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 2016. – Vol. 138, N 1. – P. 011007-1–011007-7. – DOI: 10.1115/1.4030827.

10. Титансодержащие сетчатые эндопротезы, как перспективная группа имплантатов для пластики брюшной стенки / А.А. Казанцев, В.В. Паршиков, К.А. Шемятовский, А.И. Алехин, Д.Л. Титаров, А.А. Колпаков, С.В. Осадченко // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. – 2016. – № 4. – С. 86–95. – DOI: 10.17116/hirurgia2016486-95.

11. LeBlanc K.A. Implants used for hernioplasty // Laparoscopic and robotic incisional hernia repair / ed. by K. LeBlanc. – Cham: Springer, 2018. – P. 41–84.

12. Федоров С.А., Самедова Д.А. Опыт применения титанового шелка в стоматологии хирургической // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. – 2018. – Т. 8, № 7. – С. 289.

13. Бадалян А.А., Чернавский А.Ф., Петров И.А. Клинико-психологические основы формирования

качества жизни при восстановлении биологического рельефа кости с помощью титанового шелка // Проблемы стоматологии. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 56–63.

14. *Smith D., Graciano C., Martinez G.* Recent patents on expanded metal // Recent Patents on Materials Science. Continued as Current Materials Science. – 2009. – Vol. 2, N 3. – DOI: 10.2174/1874464810902030209.

15. *Sparks T., Chase G.* Filters and filtration handbook. – 6th ed. – Boston, MA: Elsevier, 2015. – 444 p. – DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.

16. *Purchas D., Sutherland K.* Handbook of filter media. – 2nd ed. – Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2002. – 572 p. – ISBN 9781856173759.

17. Strength to weight ratio research boosts expanded metal // Aircraft Engineering and Aerospace

Technology. – 2006. – Vol. 78, N 5. – DOI: 10.1108/aeat.2006.12778ead.020.

18. *Kooistra G.W., Wadley H.* Lattice truss structures from expanded metal sheet // Materials & Design. – 2007. – Vol. 28, N 2. – P. 507–514. – DOI: 10.1016/j.matdes.2005.08.013.

19. On the influence of structural defects for honeycomb structure / Z. Wang, Z. Li, W. Zhou, D. Hui // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 142, iss. 1. – P. 183–192. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.015.

20. Design and fabrication of aluminum honeycomb structures based on origami technology / L. Wang, K. Saito, Y. Gotou, Y. Okabe // Journal of Sandwich Structures & Materials. – 2019. – Vol. 21, iss. 4. – P. 1224–1242. – DOI: 10.1177/1099636217714646.

Конфликт интересов

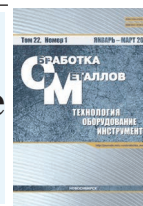
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Автор. 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



Expanded Titanium Meshes Based on Deformational Cutting

Nikolai Zubkov *

Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation

<https://orcid.org/0000-0003-3757-1299>, zoubkovn@bmstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 27 December 2019

Revised: 20 January 2019

Accepted: 14 February 2020

Available online: 15 March 2020

Keywords:

Expanded metal

Mesh

Deformational cutting

Hernioplasty

Filtration

Teflon

Titanium

Funding

This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia (Grant № 9.5617.2017/VU).

Acknowledgements

The author expresses gratitude to *Sergey Korovushkin* for the help in carrying out experiments.

ABSTRACT

Introduction. One of the fields of use of deformational cutting (DC) is the manufacturing of meshes from thin sheet materials. The principle of its production consists in finning of both side of the thin sheet in mutually perpendicular directions with a depth of cut more than half the thickness of the sheet. A significant disadvantage of such meshes is the small effective screening area (the ratio of the total area of holes to the mesh area). One of the promising fields of use of meshes obtained by DC is hernioplasty as titanium implants for the treatment of hernias and reinforcement of bone and soft tissues. Implants require an effective screening area of more than 60 %, high compliance with plastic deformations, and a large specific surface area to hold the tissues sprouting into the implant. In the paper, the DC method is considered as an alternative to the existing titanium woven mesh implants, which have an extremely high cost. **Work objective** is to study the main relationships of obtaining preforms for meshes by the DC method, the features of mesh stretching, and to analyse the resulting shapes and sizes of mesh cells. **In this paper** the two-sided finning of thin-sheet blanks of pure titanium VT1-00 with a mismatched direction of finning of opposite sides of the sheet in the range of fins crossing angles of $1.3^\circ \dots 10^\circ$ with varying the angle of workpiece undercutting and the fin pitch **were studied**. The analysis of the stretching mechanics for obtaining rhombic, hexagonal, and parallelogram forms of cells was carried out. **Results and discussion.** The range of fin pitch and crossing angles that ensure the stability of the DC and stretching stability is set. The shape of the cell depends on the length of the fins bonding obtained on opposite sides of the sheet. Increasing the bond length with by a decreasing the crossing angle leads to the transition of the cell shape from rhombic to hexagonal. A cell in the form of a parallelogram is typical for the fins of the opposite sides, which have differences in bending strength. **Conclusions:** the method of deformational cutting is an alternative of metal punching for through-cutting sheet metal and polymer for its subsequent stretching in order to obtain meshes. The meshes obtained on the basis of DC have a large surface area and an increased ability to plastic deformation. It is justified to obtain the rhombic, hexagonal, and parallelogram forms of mesh cells. The shape of the mesh cell is controlled by selecting the fins crossing angle and the pitch of the fins on opposite sides of the workpiece. The largest cell size and maximum effective screening area of the mesh are provided by meshes with hexagonal cells form at the fins crossing angles on opposite sides of the workpiece less than 3° .

For citation: Zubkov N.N. 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. (In Russian).

References

1. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. *Method of producing a surface with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method*. Patent EP 0727269 B1, 2000.
2. El'chinov V.P., Mitin E.V. Novye nerzhavayushchie kozhukhotrubnye kondensatory vodyanogo okhlazhdeniya: sochetanie effektivnosti i nadezhnosti [New stainless shell-and-tube water-cooled condensers: a combination of efficiency and reliability]. *Kholodil'nyi biznes = Refrigeration Business*, 2014, no. 1, pp. 16–22.
3. Yakomaskin A.A., Afanasiev V.N., Zubkov N.N., Morskoy D.N. Investigation of heat transfer in evaporator of microchannel loop heat pipe. *Journal of Heat Transfer*, 2013, vol. 135, iss. 10, p. 101006. DOI: 10.1115/1.4024502.

* Corresponding author

Zubkov Nikolai N., D.Sc. (Engineering), Professor
Bauman Moscow State Technical University
5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation
Tel.: +7-916-607-7948, e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

4. Solovyeva L., Zubkov N., Lisowsky B., Elmoursi A. Novel electrical joints using deformation machining technology. Pt. 2. Experimental verification. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2012, vol. 2, no. 10, pp. 1718–1722. DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2199755.
5. Shulyak Ya.I. Sily rezaniya pri deformatsionnom uprochnenii austenitnoi stali metodom deformiruyushchego rezaniya [Cutting Forces During Strain Hardening of Austenitic Steel by the Method of Deformational Cutting]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 1, pp. 12–19. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-12-19.
6. Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Poptsov V.V. Features of quench deformational cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 35–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-35-49. (In Russian).
7. Zubkov N.N. Single pass formation of threads on ductile metals by deformational cutting. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-6-17. (In Russian).
8. Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L., Voinov S.A. Shaping of heat exchanger pins by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 81–85. DOI: 10.3103/S1068798X16020258.
9. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Influence of deformational cutting data on parameters of polymer slotted screen pipes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 2016, vol. 138, no. 1, pp. 011007-1–011007-7. DOI: 10.1115/1.4030827.
10. Kazantsev A.A., Parshikov V.V., Shemyatovskii K.A., Alekhin A.I., Titarov D.L., Kolpakov A.A., Osadchenko S.V. Titansoderzhashchie setchatye endoprotezy, kak perspektivnaya gruppa implantatov dlya plastiki bryushnoi stenki [The titanium-containing mesh as a perspective group of implants for abdominal wall repair]. *Hirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova = Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2016, no. 4, pp. 86–95. DOI: 10.17116/hirurgia2016486-95.
11. LeBlanc K.A. Implants used for hernioplasty. *Laparoscopic and robotic incisional hernia repair*. Ed. by K. LeBlanc. Cham, Springer, 2018, pp. 41–84.
12. Fedorov S.A., Samedova D.A. Opyt primeneniya titanovogo shelka v stomatologii khirurgicheskoi [Experience in using titanium silk in surgical dentistry]. *Byulleten' meditsinskikh Internet-konferentsii = Bulletin of medical Internet conferences*, 2018, vol. 8, no. 7, p. 289.
13. Badalyan A.A., Chernavsky A.F., Petrov I.A. Kliniko-psikhologicheskie osnovy formirovaniya kachestva zhizni pri vosstanovlenii biologicheskogo rel'efa kosti s pomoshch'yu titanovogo shelka [Clinical and psychological bases of forming the quality of life when restoring the biological relief of bone using titanium silk]. *Problemy stomatologii = Actual problems in dentistry*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 56–63.
14. Smith D., Graciano C., Martinez G. Recent patents on expanded metal. *Recent Patents on Materials Science. Continued as Current Materials Science*, 2009, vol. 2, no. 3. DOI: 10.2174/1874464810902030209.
15. Sparks T., Chase G. *Filters and filtration handbook*. 6th ed. Boston, MA, Elsevier, 2015. 444 p. DOI: 10.1016/C2012-0-03230-9.
16. Purchas D., Sutherland K. *Handbook of filter media*. 2nd ed. Oxford, Elsevier Advanced Technology, 2002. 572 p. ISBN 9781856173759.
17. Strength to weight ratio research boosts expanded metal. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2006, vol. 78, iss. 5. DOI: 10.1108/aeat.2006.12778ead.020.
18. Kooistra G.W., Wadley H. Lattice truss structures from expanded metal sheet. *Materials & Design*, 2007, vol. 28, iss. 2, pp. 507–514. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.08.013.
19. Wang Z., Li Z., Zhou W., Hui D. On the influence of structural defects for honeycomb structure. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 142, iss. 1, pp. 183–192. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.015.
20. Wang L., Saito K., Gotou Y., Okabe Y. Design and fabrication of aluminum honeycomb structures based on origami technology. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2019, vol. 21, iss. 4, pp. 1224–1242. DOI: 10.1177/1099636217714646.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.