

УДК 621.91.01+536.248.2

Оценка точности теоретического расчета геометрических параметров капиллярных структур на титане VT1-0, получаемых деформирующим резанием

Гроссман Мария Фадеевна^(*)

ffomacha@gmail.com

SPIN-код: 8569-2387

Зубков Николай Николаевич

zoubkovn@mail.ru

SPIN-код: 7830-7179

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Проведены теоретические расчеты геометрических параметров ребрения капиллярно-транспортного назначения, формируемого методом деформирующего резания. Выполнено экспериментальное исследование фактических геометрических параметров ребрения. Осуществлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Установлена зависимость отклонения фактических значений геометрии от теоретически расчетных. Предложены коэффициенты уточняющие расчетные зависимости параметров получаемых структур.

Ключевые слова: тепловая труба, деформирующее резание, капиллярно-пористая структура, фитиль

Evaluation of the accuracy of the theoretical calculation of geometric parameters of capillary structures on titanium VT1-0 obtained by deforming cutting

Grossman Maria Fadeevna^(*)

ffomacha@gmail.com

SPIN-code: 8569-2387

Zubkov Nikolai Nikolaevich

zoubkovn@mail.ru

SPIN-code: 7830-7179

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Theoretical calculations of geometric parameters of capillary transport fins formed by the method of deforming cutting have been carried out. An experimental study of the actual geometric parameters of the fins has been performed. A comparison of the calculated and experimental data was carried out. The dependence of the deviation of the actual geometry values from the theoretically calculated ones has been established. Coefficients clarifying the calculated dependences of the parameters of the obtained structures are proposed.

Keywords: heat pipe, deforming cutting, capillary-porous structure, wick

Введение. Современные инженерные решения, будь то микроэлектроника, аэрокосмическая промышленность, энергетика или медицинское оборудование, все чаще сталкиваются с необходимостью эффективного отвода тепла от высокоинтенсивных источников энергии. Классические методы охлаждения

оказываются недостаточно эффективными при работе с мощными и миниатюрными устройствами, генерирующими значительные тепловые потоки на ограниченной площади. Тепловые трубы (ТТ) являются альтернативным решением и в настоящее время находят широкое применение в различных отраслях промышленности. ТТ — устройство для передачи тепла на значительные расстояния практически без потерь. В ТТ теплота от охлаждаемой среды отбирается на одном конце трубы за счет испарения жидкости и с потоком образующегося пара переносится на другой конец трубы, где при конденсации пара передается корпусу. Образовавшийся конденсат за счет капиллярных сил возвращается снова в зону испарения.

Основными преимуществами ТТ по сравнению с обычными теплопередающими устройствами являются высокая эффективность, простота конструкции и отсутствие движущихся частей.

Эффективность ТТ определяется характеристиками их капиллярных структур, обеспечивающих возврат рабочей жидкости в зону испарения. В настоящее время капиллярно пористые фитильные структуры ТТ изготавливают такими методами как: спекание порошков и металлического войлока, спекание многослойных металлических сеток и др. [1–4]. Подобные капиллярные структуры обладают повышенным гидравлическим сопротивлением, сложностью изготовления и невозможностью управления геометрических параметров пор. Также используются конструкционные капиллярные структуры, представляющие продольные канавки на внутренней поверхности тепловой трубы. Капиллярные структуры конструкционного типа имеют наименьшее гидравлическое сопротивление, однако существуют технологические проблемы получения узких межреберных зазоров, от которых зависит капиллярный напор, т. е. величина возможного превышения зоны нагрева над зоной конденсации. Для таких структур важнейшим фактором, определяющим капиллярно-транспортные характеристики фитиля являются геометрические параметры оребрения, особенно ширина межреберного зазора.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод механической обработки — деформирующее резание (ДР), основанный на подрезании слоев обрабатываемой заготовки и целенаправленном пластическом деформировании подрезанного слоя (рис. 1, *а*) [5].

Совокупность частично отделенных от заготовки слоев образует микро-рельеф в виде оребрения. Для пластичных материалов площадь поверхности после обработки увеличивается до 10–12 раз. Метод ДР позволяет формировать также оребрение, обладающего капиллярным эффектом на тонколистовых материалах. В дальнейшем, вырезанная из листа лента формуется в трубу, продольные края ленты свариваются, торцы герметизируются, капилляры заполняются рабочей жидкостью, образуя тепловую трубу [5].

При получении оребренных структур методом деформирующего резания (ДР) важными параметрами оребрения: p — шаг оребренной структуры, ψ — наклон ребра к основанию, h — высота ребер, a — толщина ребра, b — ширина межреберного зазора (рис. 1, *б*).

При прогнозировании геометрических параметров оребрения полученных методом ДР используются следующие формулы [6].

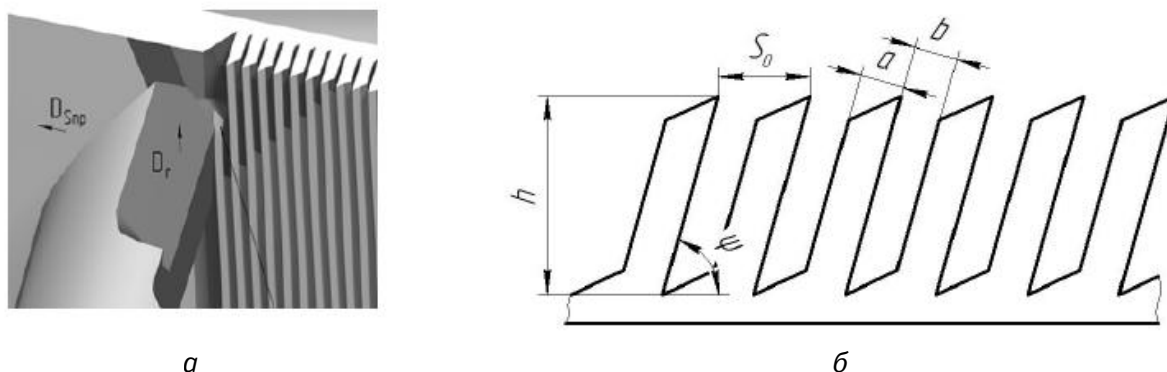


Рис. 1. а — схема получения оребрения методом деформирующего резания:

1 — резец, 2 — обрабатываемый материал, 3 — полученное оребрение; б — профиль получаемого оребрения: h — высота структуры, S_0 — шаг ребер, φ — угол наклона ребра, a — ширина ребра, b — ширина межреберного зазора

Толщина ребра рассчитывается как

$$a = S_0 \cdot \sin \varphi \cdot \xi_a, \quad (1)$$

где S_0 — величина подачи, мм/об; φ — главный угол инструмента в плане; φ_1 — вспомогательный угол инструмента в плане; ξ_a — коэффициент искажения профиля ребра, учитывающий утолщение ребра по сравнению с толщиной подрезаемого слоя.

Высота ребра рассчитывается по формуле

$$h = \frac{1}{\xi_h} \cdot \left(\frac{t}{\sin \varphi} + 0,5 \cdot S_0 \cdot \cos \varphi \right), \quad (2)$$

где: t — глубина резания, мм; ξ_h — коэффициент искажения профиля ребра, учитывающий уменьшение высоты ребра по сравнению с шириной подрезаемого слоя.

Ширина межреберного зазора рассчитывается:

$$b = S_0 \cdot (\sin \varphi_1 - \xi_a \cdot \sin \varphi), \quad (3)$$

ДР характеризуется увеличением площади поверхности после обработки (коэффициент оребрения K_{op}). Величина увеличения рассчитывается:

$$K_{op} = 1 + \frac{2 \cdot t}{S_0 \cdot \sin \varphi} \quad (4)$$

Коэффициенты ξ_a и ξ_h определяются экспериментально для каждого обрабатываемого материала и сочетания технологических параметров ДР. Как показано в [6], величина этих коэффициентов незначительна и составляет не более 1,1. Для оребрения теплообменного назначения отклонение на ~10 % реальных параметров от расчетных допустимо и для практических расчетов эти коэффициенты принимаются равными единице. Незначительное утолщение ребра, практически не влияет на теплообменные характеристики

оребрения, однако, утолщение ребра приводит к автоматическому уменьшению ширины межреберного зазора. Для капиллярных структур ширина межреберного зазора является важнейшим параметром, определяющим ее капиллярно-транспортные характеристики. Ранее исследований по отклонению ширины межреберного зазора от расчетных значений не проводилось. Недостаточная точность расчетных моделей приводит к несоответствию прогнозируемой геометрии капиллярных структур и как следствие невозможность прогнозирования свойств тепловых труб. Для устранения несоответствия необходимо введение поправочного коэффициента, который позволит связать расчетные и экспериментально полученные геометрические параметры капиллярных структур. Этот подход обеспечит калибровку теоретических моделей, позволит обеспечить большую точность прогнозирования свойств получаемых методом ДР капиллярных структур для изготовления тепловых труб. Именно нахождение этих поправочных коэффициентов, в частности для титана ВТ1-0, является целью данного исследования.

Материалы и методы. В качестве материала для экспериментальных исследований применялся титан ВТ1-0. Выбор данного материала обусловлен высокой пластичностью чистого титана (примесей не более 0,76 %) для получения максимально малых шагов и высоких межреберных зазоров, а также применимостью титана в качестве корпусов и капиллярных структур тепловых труб [7, 8].

Для получения оребрения методом ДР использовалась полоса титана толщиной 0,5 мм шириной 90 мм, длиной 450 мм. Для оребрения полосы использовался токарно-винторезный станок 1Е61МТ. Приспособление для закрепления полосы на станке показано на рис. 2.

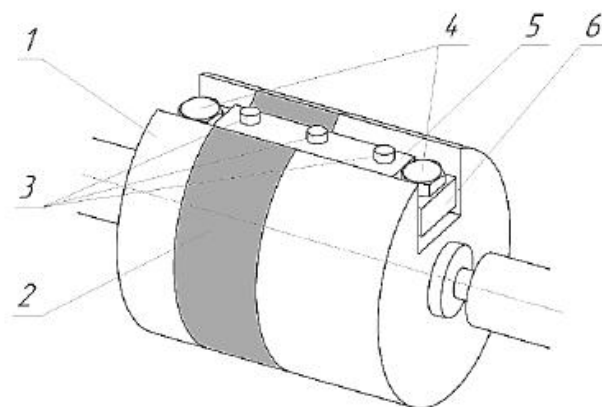


Рис. 2. Приспособление для обработки листов и лент методом ДР на токарном станке

После установки на токарный станок барабан 1 протачивался для устранения биений базовой поверхности. Обрабатываемая полоса 2 зажималась винтами 3 между зажимной 5 и натяжной 6 планками. После этого винтами 4 производилось натяжение обрабатываемой полосы 2 на барабан. Глубина резания устанавливалась от касания вершины резца поверхности ленты, натянутой на барабан.

Обработка проводилась при постоянной скорости резания $V_{\text{рез}} = 1$ м/с и подаче $S_o = 0,1$ мм/об, при глубине резания $t = 0,20-0,225$ мм. Материал режущей части инструмента — твердый сплав ВК8. Геометрические параметры инструмента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Углы инструмента для ДР

Угол	Значение, град.°
Передний угол γ	46,8
Главный задний угол α	3,0
Главный угол инструмента в плане (угол подрезания) φ	37,9
Угол наклона главной режущей кромки λ	53,8
Передний угол на вспомогательной (деформирующей кромке) γ_1	-60,0
Вспомогательный задний угол α_1	3,0
Вспомогательный угол инструмента в плане (угол отгибки) φ_1	90,0

Варьирование главным углом в плане φ (угол подрезания и вспомогательным углом инструмента в плане φ_1 (угол отгибки) осуществлялось за счет разворота инструмента в основной плоскости (рис. 3), при этом значения τ составили от -5° (разворот резцедержки по часовой стрелке) до $+15^\circ$ (разворот резцедержки против часовой стрелки).

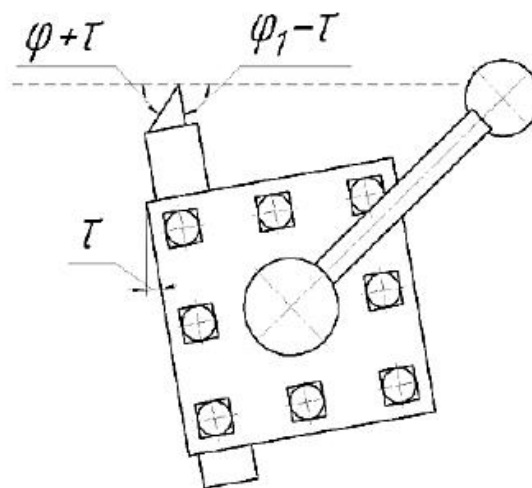


Рис. 3. Изменение углов инструмента в плане разворотом резца в основной плоскости

Измерение геометрических параметров оребрения проводилось на шлифах поперечных сечений капиллярных структур с использованием инструментального микроскопа УИМ-21. Полученные экспериментальные данные использовались для сопоставления с расчетными значениями.

Результаты и обсуждение. Фотографии поперечных срезов полученных капиллярных структур представлены в табл. 2. Расчетные значения геометрических параметров капиллярных структур и их фактические значения приведены в табл. 3. Также в табл. 3 рассчитан процент, отражающий отклонения расчетных данных от экспериментальных.

Таблица 2

Фотографии капиллярных структур, полученные при различных углах разворота резца τ в основной плоскости

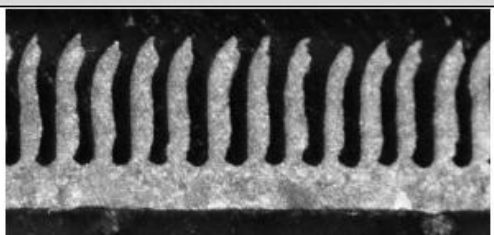
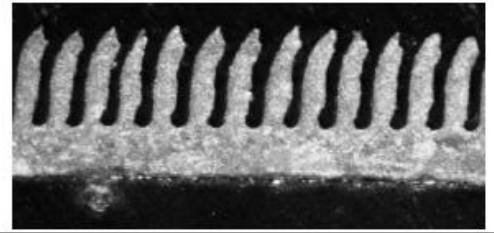
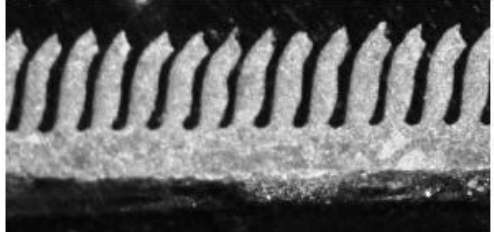
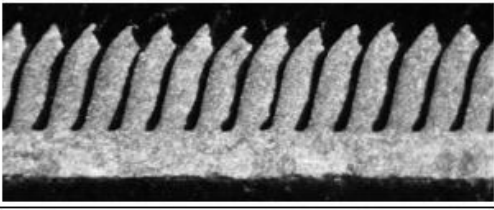
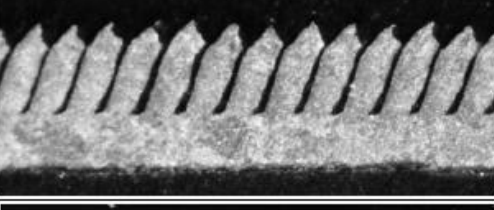
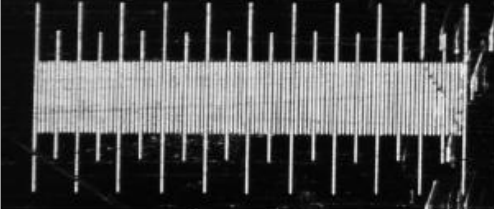
№	τ°	Глубина резания t , мм	Расчетный коэффициент увеличения площади поверхности K_{op}	Фото
1	-5	0,225	8,5	
2	0	0,20	7,0	
3	5	0,21	6,7	
4	10	0,225	6,7	
5	15	0,22	6,25	
Объект-микрометр (вся шкала – 1 мм)				

Таблица 3

Расхождение между расчетными (индекс при значении «р») и экспериментальными (индекс при значении «э») параметрами геометрических параметров капиллярных структур

N	h_p , мм	$h_э$, мм	%	b_p , мкм	$b_э$, мкм	%	a_p , мкм	$a_э$, мкм	%
1	0,40	0,35	14,3	39	35	11,4	60	50	–16,7
2	0,36	0,31	16,1	32	30	6,6	67	60	–10,5
3	0,315	0,28	12,5	26	25	4,0	73	65	–11,0
4	0,31	0,26	19,2	20	20	0	80	70	–14,0
5	0,28	0,24	16,7	13	10	10,0	84	75	–10,7

На основании сравнительного анализа получены следующие результаты:

Теоретически расчетные значения и фактические параметры оребрения имеют расхождения по всем рассматриваемым параметрам (высота ребра, ширина межреберного зазора и толщина ребра).

Для высоты ребра средние фактические значения оказались ниже расчетных. Среднее отклонение составило 15,7 %. Для учета фактического отклонения высоты ребра рекомендуется поправочный коэффициент $\xi_h = 1,16$.

Для толщины ребра фактические размеры меньше расчетных на 10–17 % (среднее значение 13 %). Этот факт противоречит ранее проведенным исследованиям по определению коэффициента утолщения ребра. Для таких материалов, как стали, алюминий, медь и ее сплавы всегда коэффициент утолщения ребра составлял более единицы [6]. Данный факт является новым и это следует учитывать при расчете параметров капиллярной структуры, получаемой ДР на титане. С другой стороны, известно, что при обычной обработке титановых сплавов толщина стружки может быть меньше ширины срезаемого слоя [9], что подтверждает идентичность физики процесса деформирующего и обычного резания. При получении капиллярных структур на титане рекомендуется использовать поправочный коэффициент $\xi_a = 0,87$.

Для ширины межреберного зазора фактические значения изменяются в диапазоне от 0 до 11,4 %. Учитывая средние отклонения предлагается в формуле (3) ввести новый поправочный коэффициент $\xi_b = 0,94$.

Полученные данные свидетельствуют что при реализации получения оребрения методом деформирующего резания геометрия капиллярных структур отличается от теоретически расчетных, причины связаны с пластической деформацией титана марки ВТ1-0, а также локальными искажениями профиля единичных ребер.

Для корректного определения геометрических параметров капиллярных структур, формируемых методом деформирующего резания на титане марки ВТ1-0, теоретические зависимости (1)–(3) могут быть уточнены с учетом поправочных коэффициентов.

Ширину межреберного зазора с учетом расхождения целесообразно рассчитывать по формуле

$$b = S_o \cdot (\sin \varphi_1 - 0,94 \cdot \sin \varphi) \quad (5)$$

Толщину ребра целесообразно рассчитывать по формуле

$$a = 0,87 \cdot S_o \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

Высоту ребра (высоту капиллярного зазора) целесообразно рассчитывать по формуле

$$h = \frac{1}{1,16} \cdot \left(\frac{t}{\sin \varphi} + 0,5 \cdot S_o \cdot \cos \varphi \right), \quad (7)$$

Заключение. Отклонения фактических параметров оребрения зафиксировано для всех исследуемых структур, что может влиять на величину создаваемого капиллярного давления и на гидравлическую проницаемость капиллярно-пористой структуры и, как следствие, на эффективность тепловых труб. Полученные результаты имеют прикладное значение и позволяют скорректировать расчетные зависимости вследствие чего повысить точность и достоверность прогнозирования эксплуатационных характеристик капиллярных структур для титана BT1-0, полученных методом ДР.

Список источников

- [1] Kunz H.R., Langston L.S., Liquid transport properties of some heat pipe wicking materials. *ASME Paper*, 1969, no. HT-17, pp. 1–11.
- [2] Freggens R. Experimental determination of wick properties for heat pipe applications. *Proc. 4-th Int. Energy Conversion Eng. Conf.* Washington, 1969, pp. 888–897.
- [3] Ferrell J.K., Alexander E.G., Piver W.T. Vaporisation heat transfer in heat pipe wick materials. *AIAA Paper*, 1972, no. 256, pp. 1–14.
- [4] Corman J.C., Walmet G.E. Vaporisation from capillary wick structures. *ASME Paper*, 1971, no. HT-35, pp. 1–8.
- [5] Thors P., Zoubkov N. *Heat Transfer Tube Including Enhanced Heat Transfer Surfaces*. Patent no. 7311137 US, Wolverine Tube, Inc., 2004.
- [6] Зубков Н.Н. *Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2001, 478 с.
- [7] Anderson W.G., R. Bonner, Hartenstine J. et al. High Temperature Titanium-Water Heat Pipe Radiator. *AIP Conf. Proc.*, 2006, vol. 813 (1), pp. 91–99. <https://doi.org/10.1063/1.2169184>
- [8] Ding C., Soni G., Bozorgi P., Piorek B., Meinhart C.D., MacDonald N.C. A Titanium Based Flat Heat Pipe. *Proceedings of the ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Vol. 13: Nano-Manufacturing Technology; and Micro and Nano Systems, Parts A and B*. Boston, Massachusetts, USA, 2008, pp. 1045–1051. <https://doi.org/10.1115/IMECE2008-68967>
- [9] Ломаева Т.В., Кугультинов С.Д., Попов И.В., Свищев В.И. Обеспечение безопасных условий токарной обработки крупногабаритных деталей из титановых сплавов на основании регулирования величины усадки стружки. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*, 2022, т. 24, № 1, с. 35–40. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.1.05>