

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА ПЛОСКИХ РАЗРЕЗНЫХ РЕБРАХ ТЕПЛОТВОДЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Наведено результати дослідження візуалізації течії на поверхні пластинчасто-розрізного ребра при обмиванні його повітряним потоком. Проведено порівняльний аналіз течії на пластинчасто-розрізному та звичайному пластинчастому ребрі. Встановлено причини інтенсифікації теплообміну на пластинчасто-розрізному ребрі.

Приведены результаты исследования по визуализации течения на поверхности пластинчато-разрезного ребра при его омывании воздушным потоком. Проведен сравнительный анализ течения на пластинчато-разрезном и обычном сплошном пластинчатом ребре. Установлены причины интенсификации теплообмена на пластинчато-разрезном ребре.

The results of research in visualization of flow on the surface of plate-cut fin while it is flowed by air stream. The comparative analysis of flow on the plate-cut fin and on the ordinary plate fin without cut. The causes of intensification of heat transfer on the plate-cut fin were determined.

b – ширина “лепестка”;
 h – высота ребра;
 h_p – глубина разрезки;
 L – линейный размер основания;
 t – шаг между ребрами;
 u – ширина зазора между “лепестками”;
 x – текущая координата по длине ребра;
 w – скорость воздушного потока;

δ – толщина ребра.

Индексы:

n – набегающий;
 n – начало;
 k – конец;
 o – основание;
 ot – отрыв.

1. Введение

Разработка и создание современных компактных радиоэлектронных аппаратов (РЭА), персональных компьютеров (ПК) выдвигает жесткие требования к повышению их надежности. Повышение удельной тепловой нагрузки в условиях большой плотности размещения и миниатюризации базовых элементов РЭА, ПК, рост их производительности при одновременном обеспечении благоприятного температурного режима неразрывно связаны с решением проблемы эффективного отвода от них избыточной теплоты. Одним из перспективных направлений для решения этой проблемы является использование теплоотводящих оребренных поверхностей с высокой теплоаэродинамической эффективностью. К ним можно отнести

поверхности с разрезным пластинчатым оребрением.

Как показано в [1], в условиях вынужденной конвекции при продольном обтекании основания и ребер пластинчато-оребренной поверхности, разрезка ребра по высоте приводит к образованию в их верхней части прямоугольных пластинчатых участков размером $h_p \times b \times \delta$, расположенных по потоку и отделенных между собой узким зазором шириной $u = \delta$, называемых “лепестками”, способствует повышению интенсивности теплообмена в 1,16...1,25 раза по сравнению с обычной пластинчато-ребристой поверхностью. В [1] установлено, что максимальная интенсивность теплообмена наблюдается при относительной глубине разрезки ребра $h_p/h = 0,6$, а аэродинамическое сопротивление при этом увеличивается на 10...35%.

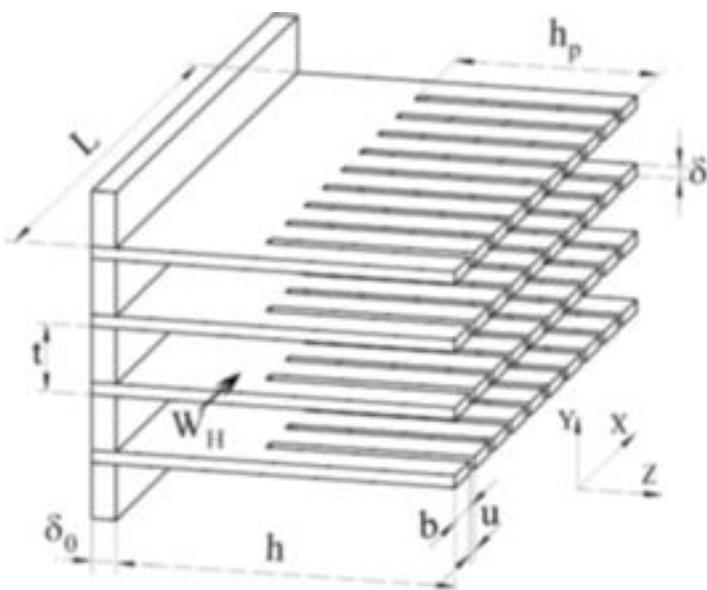


Рис. 1. Теплоотводящая поверхность с пластинчато-разрезным оребрением.

С целью изучения взаимосвязи теплообмена и течения, выяснения особенностей течения на пластинчато-разрезном ребре и влияния структуры потока на интенсификацию теплообмена теплоотводящей поверхности с пластинчато-разрезным оребрением в НТУУ „КПИ” выполнены экспериментальные исследования по визуализации течения.

2. Описание установки и методики измерений

Визуализация течения осуществлялась методом поверхностной индикации потока с помощью саже-керосиновой взвеси, которая равномерно наносилась на предварительно отполированную и окрашенную в белый цвет поверхность ребра [2, 3].

Теплоотводящие поверхности, изучаемые в [1], имели сравнительно небольшие геометрические размеры и плотную компоновку ребер. В таких условиях метод визуализации не дает возможности увидеть четкое и контрастное изображение картины течения из-за малых размеров поверхности ребер. Поэтому исследования выполнены на геометрически подобных моделях, имитирующих теплоотводящую поверхность по форме и конфигурации, выполненную в масштабе 2:1 (рис.1).

Масштабные модели поверхностей состояли из 4-х ребер толщиной $\delta = 2$ мм, высотой $h = 70$ мм и длиной $L = 140$ мм, расположенных с шагом $t = 14$ мм на плоском основании толщиной $\delta_0 = 5$ мм. Ширина “лепестка” $b = 11,2$ мм, а ширина зазора $u = 2$ мм. Ребра модели располагались горизонтально, так что зазор между торцами ребер и стенкой рабочего участка аэродинамической трубы составлял 10 мм. Модели отличались друг от друга относительной глубиной разрезки ребер ($h_p/h = 0; 0,4; 0,6; 0,8$).

Подготовленная к визуализации модель помещалась в рабочий участок аэродинамической трубы разомкнутого типа [1]. Эксперименты проводились в диапазоне скоростей набегающего потока $w_n = (5...10)$ м/с при обдуве поверхности в течение 2...3 мин и температуре воздушного потока 20...25 °С.

Исследуемая поверхность размещалась в рабочем участке аэродинамической трубы таким образом, что ее ребра располагались параллельно, а основание перпендикулярно дну канала трубы (рис. 1).

При омывании воздушным потоком ребра, нанесенная саже-керосиновая взвесь распределялась на нем в зависимости от направления течения. В результате испарения керосина на поверхности ребра получалась фиксированная осредненная картина течения из частиц сажи, отражающая особенности омывания вблизи поверхности. После окончания опыта модель извлекалась из рабочего участка, картина течения на ребре изучалась, а затем фотографировалась.

На полученных изображениях области отрыва и циркуляционного движения потока проявляются в виде темных пятен и полос, свидетельствующих о пониженных скоростях омывания, а места, омываемые потоком с более высокими локальными скоростями, имеют светлую окраску.

Необходимо отметить, что с уменьшением скорости набегающего потока ослабляется взаимодействие потока с саже-керосиновой взвесью, нанесенной на поверхность для визуализации течения. Опытами установлено, что при $w_n < 6$ м/с наблюдается снижение чувствительности использованного метода визуализации течения из-за уменьшения текучести саже-керосиновой взвеси, на поверхности ребра. Поэтому картины

течения получены для наиболее благоприятного интервала скоростей обдува $w_H = (6...10)$ м/с.

3. Результаты исследований и их анализ

Четкие и контрастные картины течения получены при максимальной скорости набегающего потока $w_H \approx 10$ м/с, что эквивалентно числу Рейнольдса $Re = 17 \cdot 10^3$. При $w_H < 10$ м/с не выявлено каких-либо специфических особенностей течения, а картины визуализации качественно подобны рассмотренным для $w_H = 10$ м/с. Поэтому анализ результатов визуализации течения проведен для экспериментов, выполненных при $w_H = 10$ м/с.

3.1 Сплошное ребро

На рис. 2 представлена фотография, иллюстрирующая результаты экспериментов по визуализации течения на поверхности сплошного неразрезного ребра. Набегающий поток направлен справа налево. Как показывает анализ рис. 2, вся картина течения может быть условно разбита на 5 областей.

Область 1 представляет собою темную полосу шириной $x_{от} = (5...6)$ мм и свидетельствует об образовании отрывного пузыря при обтекании потоком передней острой кромки ребра. Эта область характеризуется медленно вращающейся вихревой структурой, возникающей вследствие гидродинамического взаимодействия оторвавшегося на входной кромке потока и пограничного слоя возвратного течения [4,5].

В [6] показано, что ширина зоны отрыва, как правило, зависит от толщины ребра δ и степени турбулентности потока Tu . Предварительными измерениями установлено, что степень турбулентности набегающего потока в проведенных опытах составляла $Tu \approx 5\%$. Ширина зоны отрыва, рассчитанная по рекомендуемым формулам [6], равна $x_{от} \approx 5,5$ мм, что согласуется с найденной координатой данного исследования.

За отрывным пузырем 1 расположена область 2, состоящая из мелких точек и сажи, для которой характерна мелкомасштабная вихревая структура. Образование подобных структур свидетельствует о развитии при $Tu > 0$ псевдолами-

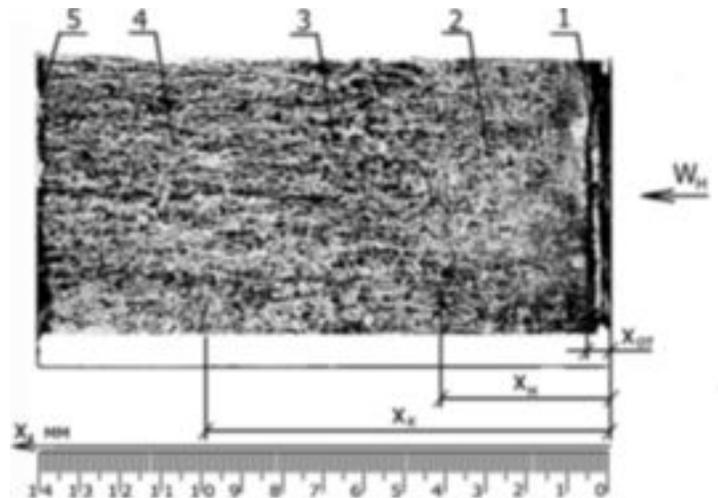


Рис. 2. Картина течения на поверхности сплошного пластинчатого ребра при $w_H \approx 10$ м/с.

нарного пограничного слоя. В отличие от ламинарного пограничного слоя, развивающегося при $Tu = 0$, в псевдоламинарном пограничном слое присутствуют возмущения различной природы, вызванные в данном случае отрывом с передней кромки и внешней турбулентностью в межреберном канале.

Протяженность области 2, занятой псевдоламинарным пограничным слоем, составляет $x_H - x_{от} = 31$ мм, где $x_H \approx 36$ мм – координата начала ламинарно-турбулентного перехода, которой соответствует область 3 с длинными темными полосами, оканчивающимися в координате $x_K = 100$ мм.

Полученные экспериментальные данные по формированию области ламинарно-турбулентного перехода и ее протяженности согласуются с результатами [5] для аналогичных условий обтекания пластины с прямой передней кромкой турбулизированным потоком.

Приведенные в [5] рекомендации позволяют уточнить координату конца перехода по формуле

$$(x_K - x_H)/x_K = 0,7 = \text{const.} \quad (1)$$

Подставляя в (1) координату начала перехода x_H , рассчитаем координату конца перехода:

$$x_K = \frac{x_H}{0,3} \approx 102 \text{ мм} . \quad (2)$$

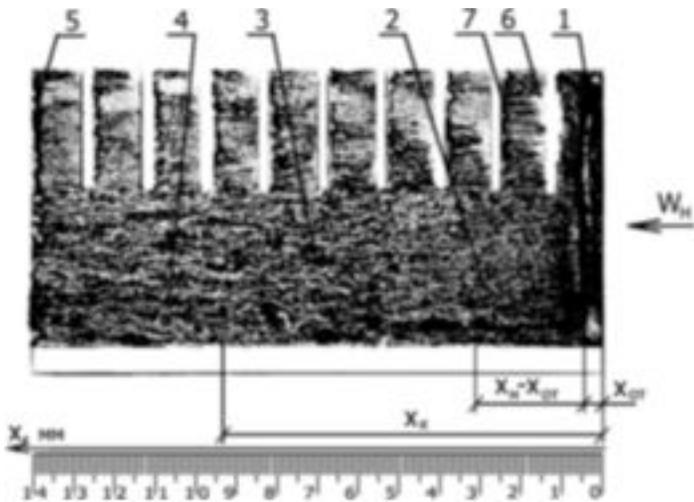


Рис. 3. Картина течения на поверхности ребра с относительной глубиной разрезки $h_p/h = 0,4$ при $w_H = 10$ м/с.

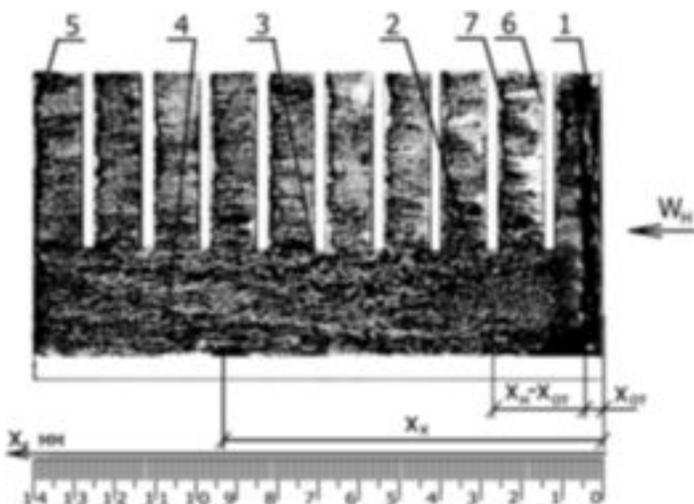


Рис. 4. Картина течения на поверхности ребра с относительной глубиной разрезки $h_p/h = 0,6$ при $w_H = 10$ м/с.

Полученное расчетное значение практически совпадает с координатой конца перехода, определенной на основе картины визуализации $x_k = 100$ мм (рис. 2).

Область 4, расположенная за областью ламинарно-турбулентного перехода, представляющего многочисленные параллельные борозды из сажевых частиц, соответствует развитию турбулентного пограничного слоя на поверхности ребра. В этой области наблюдается укрупнение вихрей, прогрессирующих вниз по потоку.

Узкая темная полоса 5 на кормовой части поверхности свидетельствует о срыве потока с задней кромки ребра, предшествующем течению потока в ближнем следе.

Опытами подтверждается образование вихревых структур в углах между основанием и ребрами, что говорит о существовании явных признаков трехмерного течения вблизи входа в межреберный полукрытый канал.

3.2 Разрезное ребро

Картины течения на поверхности разрезных ребер с относительной глубиной разрезки $h_p/h = 0,4; 0,6; 0,8$ приведены на рис. 3 – 5 соответственно. При анализе, картина течения на пластинчато-разрезном ребре условно разделена на две части:

- ◆ примыкающий к основанию участок сплошного ребра без разрезки, высотой $(h-h_p)$;
- ◆ участок из последовательно расположенных по потоку с шагом b -и прямоугольных пластин “лепестков”, высотой h_p и шириной b .

На участке с неразрезной частью ребра при $h_p/h = 0,4$ и $0,6$ (рис. 3, 4) характер течения качественно сохранился таким же, как и для сплошного ребра: за отрывом (область 1) развивается псевдоламинарный пограничный слой (область 2) с последующим ламинарно-турбулентным переходом (область 3), образованием за ним турбулентного пограничного слоя (область 4) и срыва потока с выходной кромки ребра (область 5).

При разрезке $h_p/h = 0,4$ процесс ламинарно-турбулентного перехода сохраняется таким же, как и без разрезки при $h_p/h = 0$ ($x_H - x_{от} = 31$ мм). При $h_p/h = 0,6$ протяженность области 2, занятой псевдоламинарным пограничным слоем, сокращается до $x_H - x_{от} \approx 21$ мм (рис. 3). Это свидетельствует о росте турбулизации потока на неразрезном участке ребра.

При $h_p/h = 0,8$ структура течения на неразрезном участке ребра отличается тем, что вихревые структуры в углах между ребрами и основанием занимают практически всю его высоту (рис. 5). Наиболее отчетливо эти структуры видны вблизи передней кромки ребра непосредственно за отрывом. Указанный факт позволяет косвенно оценить размер вихрей у основания, который в первом приближении можно считать равным или

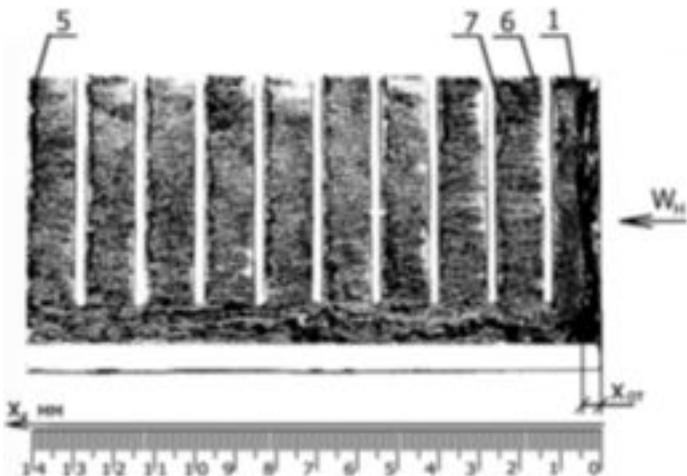


Рис. 4. Картина течения на поверхности ребра с относительной глубиной разрезки $h_p/h = 0,8$ при $w_n = 10$ м/с.

несколько превышающим высоту неразрезного участка.

При $h_p/h < 0,6$ размеры вихрей вблизи основания не препятствуют развитию за отрывом пограничного слоя смешанного типа.

При анализе результатов визуализации на разрезном участке ребра необходимо отдельно рассматривать первый “лепесток” и следующие за ним.

На первом входном “лепестке”, как и на неразрезном участке, имеет место темная сажевая полоса области отрыва 1, за которой развивается псевдоламинарный пограничный слой. На последующих “лепестках” отчетливо видны тонкие полосы области 6, свидетельствующие об возникновении ламинарного или псевдоламинарного пограничного слоя.

На всех задних кромках “лепестков” просматривается узкая темная полоса 7, указывающая на срыв потока, охватывающий высоту “лепестка” h_p .

Одной из особенностей течения является то, что разрезка ребра приводит к деформации пограничного слоя в месте разрыва поверхности ребра с восстановлением процесса его развития на поверхности следующего “лепестка” и характеризующиеся присоединенно-отрывным течением на разрезной части ребра. Указанное обстоятельство вызывает уменьшение толщины пограничного слоя на ребре, что способствует росту интенсивности теплообмена в целом на оребренной поверхности.

Другой особенностью течения в системе разрезки ребер является возможность небольших перетоков среды через зазоры между “лепестками” в межреберные каналы. Можно предположить, что в местах разрезки имеет место обмен количеством движения, вызывающий дополнительную генерацию турбулентности.

Однако при глубине разрезки $h_p/h = 0,8$ в условиях отсутствия пограничного слоя смешанного типа, располагающегося при $h_p/h = 0...0,6$ между “лепестками” и вихревыми структурами вблизи основания, перетоки в местах разрезки могут способствовать снижению суммарной турбулизации потока. С ростом глубины разрезки можно ожидать ослабление вихревых структур вблизи основания из-за непосредственного влияния перетоков. Именно этим обстоятельством может быть объяснено наличие максимума теплообмена при $h_p/h = 0,6$ и снижение интенсивности теплообмена при $h_p/h = 0,8$, наблюдаемые в [1].

5. Заключение

На поверхности пластинчато-разрезного ребра обнаружены следующие особенности структуры течения:

- ◆ на входной кромке ребра образуется локальный замкнутый отрыв (отрывной пузырь);
- ◆ за отрывом на неразрезной части сплошной поверхности ребра при $h_p/h = 0...0,8$ в углах вблизи основания располагаются зоны трехмерного течения с вихревыми структурами;
- ◆ за отрывом на неразрезной поверхности ребра при $h_p/h = 0...0,6$ между вихревыми структурами и разрезкой развивается смешанный тип течения в пограничном слое;
- ◆ на поверхностях “лепестков” развивается псевдоламинарный пограничный слой, прерываемый разрезкой;

В первом приближении обоснована обнаруженная в [1] корреляция между интенсивностью среднего теплообмена и турбулизацией потока в зависимости от относительной глубины разрезки ребер.

На примере конкретной теплоотводящей поверхности с пластинчато-разрезным оребрением показано, что разрезка ребер является перспек-

тивным методом повышения эффективности систем охлаждения элементов РЭА и ПК, однако для выбора оптимальной ширины, шага разрезки необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Бурлей В.Д., Руденко А.И.* Влияние разрезки, поворотов и отгибки ребер на теплоаэродинамические характеристики поверхностей теплообмена // Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 24, № 4. – С. 71–78.

2. *Письменный Е.Н.* Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-ребренных труб. – К.: Альтерпрес, 2004. – 243 с.

3. *Письменный Е.Н.* Исследование течения на поверхности ребер поперечно-ребренных труб // Инж.-физ. Журн. – 1984. – Т.47, №1. – С. 28–34.

4. *Дыбан Е.П., Эпик Э.Я.* Теплообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. – К.: Наукова думка, 1985. – 293 с.

5. *Эпик Э.Я.* Проблемы прогнозирования и расчета верхнего теплового ламинарно-турбулентного перехода (проблемный доклад)// Труды V Минского международного форума по тепло-и массообмену, 24-28 мая 2004, – Минск. – 2004. –10 с.

6. *Dyban E.P., Epik E.Ya., Yushina L.E.* Heat transfer on the surface of longitudinally streamlined bodies in the presence of closed separation and external flow turbulization // Heat Transfer Conference. Brighton, UK, 14-18 August 1994, vol.3, pp.25–30.