УДК 536.25:62-405.8; 621.375

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ НА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Ю.И. Шанин, О.И. Шанин

ФГУП «НИИ НПО «Луч», Подольск, Россия, syi@luch.podolsk.ru

Из наиболее сильных технологических факторов, оказывающих влияние на тепло-гидравлические характеристики системы охлаждения лазерного зеркала, можно выделить два: 1) шероховатость, присущую способу формирования структуры и способу ее соединения, и 2) термическое сопротивление соединения.

В экспериментах использовались образцы систем охлаждения, полученные различными способами: нарезанием фрезой, волочением, электроэрозионной обработкой.

Шероховатость увеличивает коэффициент гидравлического сопротивления. Этот факт широко известен и среди множества формул, аппроксимирующих экспериментальные данные, выберем зависимость, приведенную в монографии Шлихтинга Г. и хорошо описывающую результаты для эквивалентной шероховатости в переходной области ее влияния (т.е. в доавтомодельной области):

$$\frac{1}{\sqrt{\xi_{ш}}} = 1.74 - 2\lg\left(\frac{2K_S}{d_г} + \frac{18.7}{\mathrm{Re}\sqrt{\xi_{ш}}}\right). \qquad (1)$$

Она использовалась нами для обобщения экспериментальных результатов. Для конкретного ее использования необходимо установить связи между технической шероховатостью, присущей способу формирования и эквивалентной песочной шероховатостью K_s. Сведения о высоте микронеровностей R и R_z, образовавшихся в результате электроэрозионной обработки каналов, в зависимости от различных факторов содержат работы [1, 2]. В зависимости от материала и режима обработки (величины тока I и его частоты f) [1,2] величина R_z у металлокерамического твердого сплава Т14К8 составляет 5 мкм (I=5А, f=88 кГц), а у стали 45 - R_z=10 мкм (I=5А, f=99 кГц). Изменение характеристик процесса (I=40А, f=8 кГц) приводит к увеличению шероховатости до 22 мкм у Т14К8 и 30 мкм у стали 45. Для нержавеющей стали 1Х18Н9Т величина R_z=40÷80 мкм в зависимости от длительности и энергии импульса [1].

При исследовании тепло-гидравлических характеристик у канальных систем охлаждения, сформированных в молибдене электроэрозионным способом, шероховатость изменялась в широком диапазоне R_z=5÷30 мкм. Выше речь шла о среднем значении величины шероховатости. Исследования [2] показывают, что среднее значение R шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом, смещено на величину ΔR в сторону меньших значений высот по сравнению с нормальным законом распределения шероховатости, полученной механической обработкой, а наиболее подходящим законом для описания статистического размера шероховатости является нормальный логарифмический закон. При отсутствии закономерности, связывающей K_s и среднее значение R_z, в качестве первого приближения можно использовать K_s=R_z.

Интенсифицирующее теплоотдачу влияние шероховатости также хорошо известно. Наряду с многочисленными экспериментальными данными имеются различные аналитические подходы к учету интенсифицирующего влияния шероховатости. Не останавливаясь на сравнительном анализе преимуществ и недостатков различных подходов, нами использован метод расчета теплоотдачи шероховатой поверхности при турбулентном течении, основанный на четырехслойной схеме потока (вязкий подслой, промежуточная область, вихревое ядро во впадине и турбулентное ядро в основном потоке) [3], который справедлив в широком диапазоне чисел Re и Pr. Формула для теплоотдачи носит аддитивный характер для вкладов в отдельных слоях и имеет вид (при отнесении Nu к гладкой поверхности):

$$Nu_{ш} = \left(1+\frac{1.75}{\Pr+8}\right)\mathrm{Re}\Pr\sqrt{\frac{\xi_{ш}}{8}}\left\{\begin{array}{l}\sqrt{\frac{8}{\xi_{ш}}}\left(1.325\sqrt{\xi_{ш}}+1\right)\left[1-\left(\frac{2K_S}{d_г}\right)^{\sqrt{\xi_{ш}}}\right]+5\sqrt{n}\Pr\left(\frac{1.285}{\Pr^{0.21}}-\frac{0.265}{\Pr^{1.2}}\right)+\\ 5\sqrt{n}\ln(5\Pr+1)+\sqrt{n}\,\dfrac{\left(2K_S/d_г\right)\mathrm{Re}\sqrt{\xi_{ш}/32}-30/\sqrt{n}}{\dfrac{1}{\Pr}+0.4\sqrt{\dfrac{\xi_{ш}}{32}}\left(1-\dfrac{2K_S}{d_г}\right)\dfrac{2K_S}{d_г}}\end{array}\right\}^{-1} \quad (2)$$

где $n=F_ш/F_{гл}$ - отношение полной шероховатой поверхности к поверхности гладкой трубы того же диаметра, $\xi_ш$- определен по формуле (1).

Формула (2) содержит величину *n*, вычислить которую можно достаточно просто для искусственно нанесенной шероховатости. В случай технической шероховатости рассчитать *n* можно, имея статистический закон распределения шероховатости по размеру. Для оценок можно использовать первое приближение $n\approx1$.

Интенсификация теплоотдачи шероховатых поверхностей по сравнению с гладкими каналами имеет место при Re=*const*. При условии ограничения перепада давления на теплообменнике (Δp=*const*) выигрыш в теплоотдаче при шероховатых стенках канала теряется за счет уменьшения расхода. Эффективность шероховатости с теплообменной точки зрения в этом случае можно оценить в соответствии с работой [4] по отношениям $\left(Nu_ш/Nu_{гл}\right)/(\xi_ш/\xi_{гл})$, $\left(Nu_ш/Nu_{гл}\right)^{3.5}/(\xi_ш/\xi_{гл})$.

Нами исследовано поведение безразмерных сопротивления $\bar{\xi}=\xi_ш/\xi_{гл}$ и теплоотдачи $\overline{Nu}=Nu_ш/Nu_{гл}$ в зависимости от высоты микронеровностей $d_г/2K_S$ (рис.1, 2) и числа Рейнольдса Re (рис.3) для различных теплоносителей - вода (Pr=7) и воздух (Pr=0.71). При этом для гладких каналов принимались зависимости, хорошо зарекомендовавшие себя в области развитого турбулентного течения:

$$\xi_{гл}=0.316\,\mathrm{Re}^{-0.25},\ Nu_{гл}=0.021\Pr^{0.43}\mathrm{Re}^{0.8}.$$

Сопротивление сильно возрастает при малых отношениях $d_г/2K_S$, теплоотдача нарастает медленнее. Применение воды при шероховатости $50<d_г/2K_S<100$ дает отношение $\overline{Nu}/\bar{\xi}=0.95\div1.02$ (рис.1б) и шероховатость практически не влияет на эффективность $(\overline{Nu}^{3.5}/\bar{\xi})$. Использование же воздуха для этих же диапазонов параметра $d_г/2K_S$ дает $\overline{Nu}/\bar{\xi}=0.75\div0.77$ (рис.2б) и энергетическая эффективность интенсификации от шероховатости сильно падает ($(\overline{Nu}^{3.5}/\bar{\xi})=0.5\div0.54$).

В оценках использовано предположение *n*=1. В случае же *n*=2 заметно (на 20÷30%) снижается $\overline{Nu}$, а, следовательно, и $\overline{Nu}/\bar{\xi}$. Использование для шероховатых каналов известной зависимости Нуннера [4]

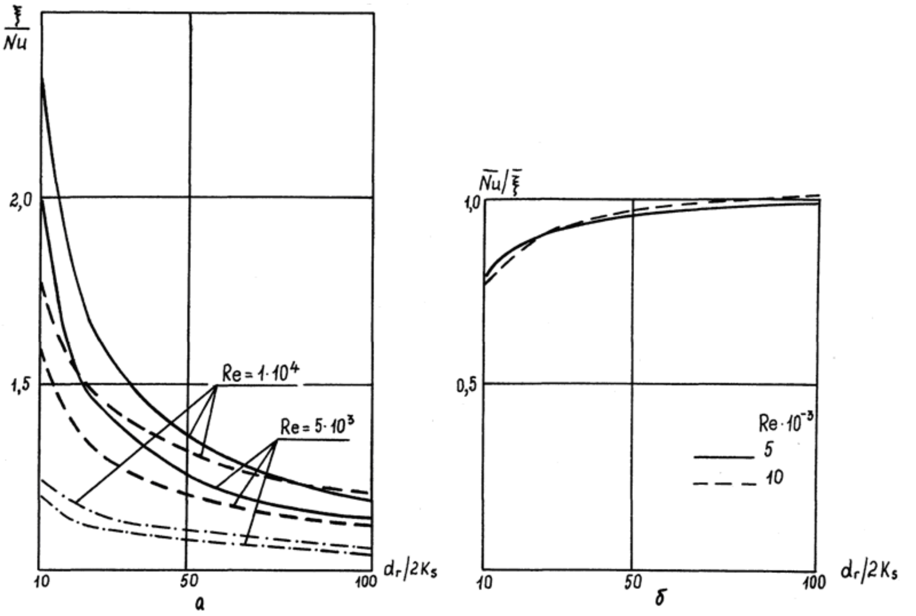

Рис. 1. Зависимость относительных коэффициентов трения $\overline{\xi}$ $=\xi_{ш}/\xi_{гл}$ и теплоотдачи $\overline{Nu}$ $=Nu_{ш}/Nu_{гл}$ от высоты микронеровностей при турбулентном течении воды, Pr=7: сплошная линия - $\overline{\xi}$, штриховая линия - $\overline{Nu}$ [3], штрихпунктирная линия - $\overline{Nu}$ [4, Нуннер].

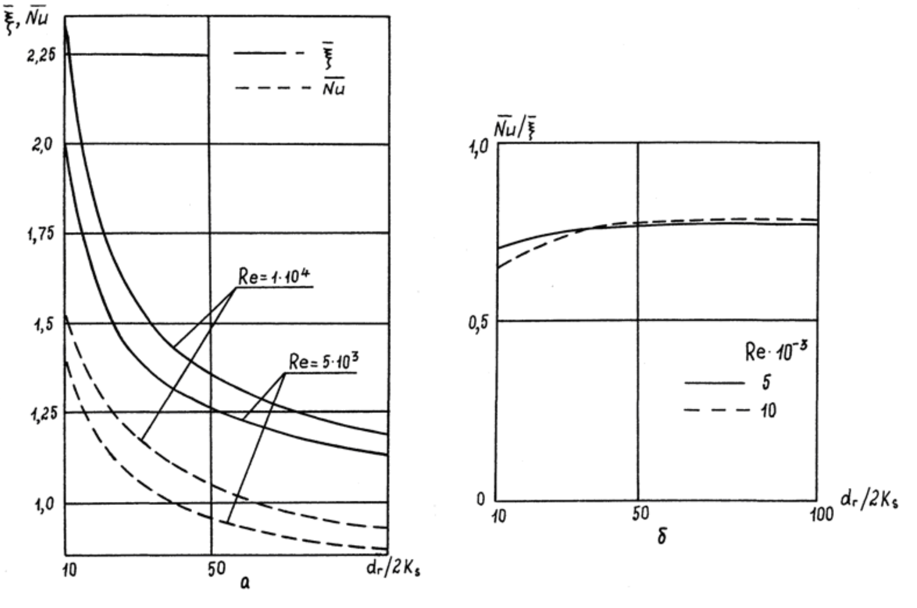

Рис. 2. Зависимость относительных коэффициентов трения $\overline{\xi}$ $=\xi_{ш}/\xi_{гл}$ и теплоотдачи $\overline{Nu}$ $=Nu_{ш}/Nu_{гл}$ от высоты микронеровностей при турбулентном течении воздуха, Pr=0.7.

$$\overline{Nu} = \frac{Nu_{ш}}{Nu_{гл}} = \frac{\xi_{ш}}{\xi_{гл}} \frac{1 + 1.5\,\mathrm{Re}^{-1/8}\,\mathrm{Pr}^{-1/6}(\mathrm{Pr}+1)}{1 + 1.5\,\mathrm{Re}^{-1/8}\,\mathrm{Pr}^{-1/6}(\dfrac{\xi_{ш}}{\xi_{гл}}\mathrm{Pr}+1)}, \qquad (3)$$

дает несколько меньшие результаты, чем в случае использования формулы (2) при n=1. Это может свидетельствовать о том, что n>1. С другой стороны, авторы [4] критикуют зависимость (3) из-за ошибочной физической модели, положенной Нуннером в основу своих расчетов.

Таким образом, теплоотдача и энергетическая эффективность плоских теплообменников, работающих на воде (Pr=5÷10) при условии ΔP=*const* практически не зависели от шероховатости. Можно показать, что при одностороннем тепловом потоке в такой теплообменник шероховатость стенок каналов оказывает слабое влияние на приведенные характеристики теплоотдачи [$(\alpha_{пр})_ш/(\alpha_{пр})_{гл}$]=1.1÷1.2 и сильнее сказывается на теплоизоляции конструкции ([$(К_{ти})_ш/(К_{ти})_{гл}$]=0.4÷0.5.

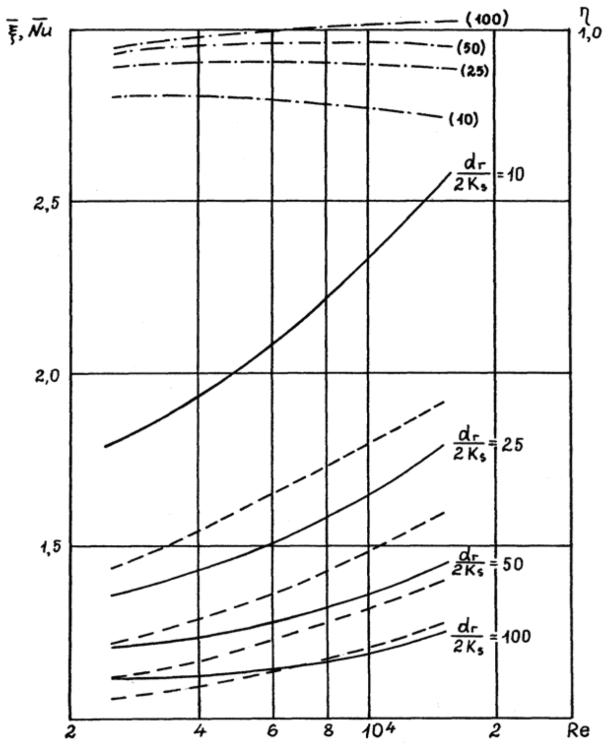

Рис. 3. Зависимость относительных трения $\overline{\xi}$ (сплошная кривая) и теплоотдачи $\overline{Nu}$ (штриховая кривая) и эффективности $\eta=\overline{Nu}/\overline{\xi}$ для шероховатых поверхностей от числа Рейнольдса (вода, Pr=7).

Подробное аналитическое решение для температурного поля при термическом сопротивлении между ребрами получено в [5] (включая двухстороннее расположение термосопротивления, характерное для систем охлаждения из гофров). Там же проанализировано влияние на коэффициент приведенной теплоотдачи $\alpha_{пр}$, скачок температуры на границе пластина-ребро в зависимости от интенсивности охлаждения, величины термического сопротивления $\overline{R}_T=\lambda R_т/h_к$ и места его расположения.

Здесь анализируется влияние термосопротивления на коэффициент интенсификации теплоотдачи $К_{ин}=f(\varepsilon,R_т)=\alpha_{пр}/\alpha_0$ и термоперемещение нагреваемой поверхности.

Напомним, что, если имеется термосопротивление со стороны теплонагруженной стороны теплообменника (т.е. $R_{т1}=R_т$, $R_{т2}=0$), то приведенная теплоотдача описывается формулой [5]:

$$\alpha_{пр} = \varepsilon\alpha_0 + (1-\varepsilon)\frac{\lambda m th(mh+\varphi)}{1+\lambda m R_T th(mh+\varphi)} \quad . \tag{4}$$

Коэффициент интенсификации теплоотдачи при отсутствии термосопротивления имеет вид:

$$K_{ин} = \frac{\alpha_{пр}}{\alpha_0} = \frac{(1-\varepsilon)D}{Bi_0}\frac{(1-\varepsilon)D\,\mathrm{th}(D\widetilde{h})+\varepsilon\,\mathrm{Bi}_0}{(1-\varepsilon)D+\varepsilon\,\mathrm{Bi}_0\,\mathrm{th}(D\widetilde{h})}+\varepsilon \ , \tag{5}$$

где $\widetilde{h}=h/d_г$, $D=\sqrt{\mathrm{Bi}/(1-\varepsilon)}$, $Bi=\alpha_V d_г^2/\lambda=2\varepsilon(2\widetilde{h}-1)\,\mathrm{Nu}/(\Lambda\widetilde{h})$, $\mathrm{Bi}_0=\mathrm{Nu}/\Lambda$, $\Lambda=\lambda/\lambda_ж$.

Опуская преобразования, из формулы (5) получено:

$$K_{ин}(R_T) = \frac{(1-\varepsilon)D}{Bi_0}\frac{(1-\varepsilon)D\,\mathrm{th}(D\widetilde{h})+\varepsilon\,\mathrm{Bi}_0}{(1-\varepsilon)D+\varepsilon\,\mathrm{Bi}_0\mathrm{th}(D\widetilde{h})+\overline{R}_T\widetilde{h}D\left[\varepsilon\,\mathrm{Bi}_0+(1-\varepsilon)D\,\mathrm{th}(D\widetilde{h})\right]}+\varepsilon \ . \tag{6}$$

Выделяя в явном виде пористость и, несколько преобразуя константы, получим выражения для вариантного расчета $К_{ин}$ (например, на микрокалькуляторе) для канальной системы охлаждения:

$$K_{ин}(R_T) = \frac{\sqrt{C_1\varepsilon(1-\varepsilon)}}{C_2} \frac{\sqrt{C_1\varepsilon(1-\varepsilon)}\,\mathrm{th}\left[\sqrt{\tilde{h}^2 C_1\varepsilon/(1-\varepsilon)}\right] + \varepsilon C_2}{\sqrt{C_1\varepsilon(1-\varepsilon)} + \varepsilon C_2\,\mathrm{th}(\sqrt{\tilde{h}^2 C_1\varepsilon/(1-\varepsilon)}) + \overline{R}_T\sqrt{\tilde{h}^2 C_1\varepsilon/(1-\varepsilon)}\left[\varepsilon C_2 + \sqrt{C_1\varepsilon(1-\varepsilon)}\,\mathrm{th}\left[\sqrt{\tilde{h}^2 C_1\varepsilon/(1-\varepsilon)}\right]\right]} + \varepsilon \quad (7)$$

где $C_1 = (\mathrm{Nu}/\Lambda)[2(2\tilde{h}-1)/\tilde{h}]$, $\quad C_2 = \mathrm{Nu}/\Lambda$.

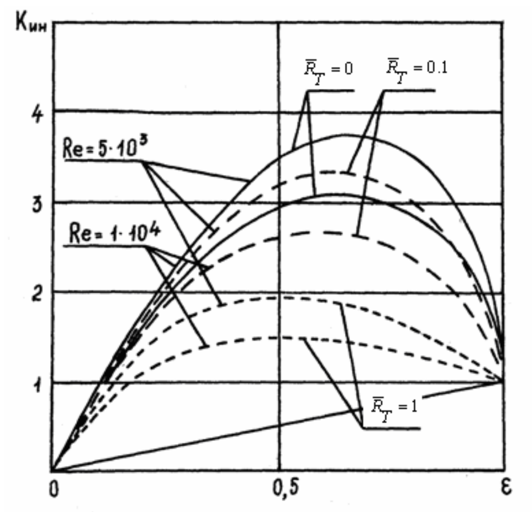

Рис. 4. Зависимость коэффициента интенсификации теплоотдачи от пористости при параметрическом изменении скорости течения теплоносителя и величины термического сопротивления $\overline{R}_T$ ($\overline{R}_T = \lambda R_т/h$)(прямоугольный канал из меди, $h_к$=4 мм, $d_г$=1.6 мм).

Полученную формулу (7) проиллюстрируем для канальной системы охлаждения ($h_к$=4 мм, $\delta_к=\delta_р$=1мм), сформированной в меди (Λ=380/0.6), по каналам которой в турбулентном режиме протекает вода комнатной температуры ($\Pr\approx 7$, $\mathrm{Nu}=0.021\Pr^{0.43}\mathrm{Re}^{0.8}$). В зависимости от пористости при параметрическом изменении числа Re и термосопротивления получен график на рис.4. Наряду с двукратным уменьшением $К_{ин}$ при $\overline{R}_T$ =1 по сравнению с $\overline{R}_T$ =0 имеется также тенденция к уменьшению оптимальной пористости с ε=0.75÷0.8 до ε=0.45÷0.55.

Деформации тепловоспринимающей стороны теплообменника состоят из термоперемещений за счет терморасширения и изгиба. Так как изгибную составляющую можно однозначно связать с терморасширением, то анализировалось только поведение терморасширения без и с термосопротивлением. Согласно [5] терморасширение пакета охлаждения $\delta(R_т)$ с учетом термосопротивления со стороны теплонагруженной пластины рассчитывается по формуле:

$$\delta(R_T) = \frac{q_0\beta}{\lambda m}\left\{\frac{mh_1^2}{2} + \frac{h_1 m[1 + R_T\lambda m\,\mathrm{th}(mh+\varphi)]\mathrm{ch}(mh+\varphi) + \mathrm{sh}(mh+\varphi) - m(h_1+h)\,\mathrm{sh}\,\varphi\,\mathrm{ch}\,\varphi}{(1-\varepsilon)m\left[\mathrm{sh}(mh+\varphi)(1+\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\alpha_0 R_T) + \mathrm{th}\,\varphi\,\mathrm{ch}(mh+\varphi)\right]}\right\}. \quad (8)$$

Вводя обозначения x=mh, y=mh+φ , $\overline{R}_T = R_т\lambda/h$, $\overline{h}=h_1/h$, и обезразмеривая (8), получим

$$\overline{\delta}(R_T) = \frac{\delta(R_T)}{\left(\frac{q_0\beta h_1^2}{\lambda}\right)} - \frac{1}{2} = \frac{\overline{h}(1+\overline{R}_T x\,\mathrm{th}\,y)\mathrm{ch}\,y + \mathrm{sh}\,y - \mathrm{sh}\,\varphi - \overline{h}x\,\mathrm{ch}\,\varphi - x\,\mathrm{ch}\,\varphi}{(1-\varepsilon)x^2\overline{h}^2\left[\mathrm{sh}\,y\left(1+\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\alpha_0 R_T\right) + \mathrm{th}\,\varphi\,\mathrm{ch}\,y\right]} . \quad (9)$$

При $R_т$=0 имеем из (9)

$$\overline{\delta} = \frac{\delta}{\left(\frac{q_0\beta h_1^2}{\lambda}\right)} - \frac{1}{2} = \frac{\mathrm{ch}\,\varphi[\mathrm{ch}\,y + \mathrm{ch}\,\varphi - \frac{1}{x\overline{h}}(\mathrm{sh}\,y - \mathrm{sh}\,\varphi - x\,\mathrm{ch}\,\varphi)]}{(1-\varepsilon)x\overline{h}\,\mathrm{sh}(x+2\varphi)} . \quad (10)$$

Степень воздействия термосопротивления на перемещение охарактеризуем отношением

$$\tilde{\delta} = \frac{\bar{\delta}(R_T)}{\bar{\delta}} = \frac{\left\{\bar{h}x\left[1+\bar{R}_T x \operatorname{th} y\right]\operatorname{ch} y + \operatorname{sh} y - \operatorname{sh}\varphi - \bar{h}x\operatorname{ch}\varphi - x\operatorname{ch}\varphi\right\}\operatorname{sh}(x+2\varphi)}{x\bar{h}\operatorname{ch}\varphi\left[\operatorname{sh} y(1+\bar{R}_T x \operatorname{th} y) + \operatorname{th}\varphi\operatorname{ch} y\right]\left[\operatorname{ch} y - \operatorname{ch}\varphi + \frac{\operatorname{sh} y - \operatorname{sh}\varphi - x\operatorname{ch}\varphi}{x\bar{h}}\right]}. \quad (11)$$

Несмотря на сложную функциональную зависимость, (11) не содержит размерных величин и позволяет провести качественный и количественный анализ по безразмерным комплексам X, $\bar{R}_T$, φ. Относительное терморасширение $\tilde{\delta}$ возрастает с увеличением X, $\bar{R}_T$ и уменьшается с ростом φ, и наиболее сильно проявляет себя при больших X (рис.5). Паяное соединение материалов с λ=150÷400 Вт/(м·К) может увеличить $\tilde{\delta}$ на 15÷100%.

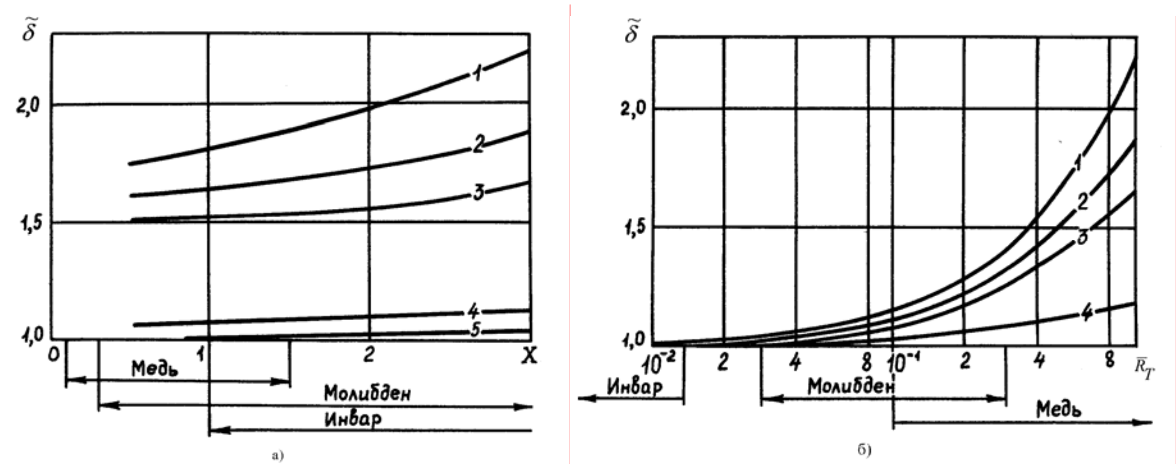

Рис. 5. Влияние термического сопротивления между подложкой и ребрами на относительное терморасширение при $\bar{h}$ =1/3: а) в зависимости от интенсивности охлаждения X (1-3 - $\bar{R}_T$=1; 1 - φ=0.1; 2 - φ=0,2; 3 - φ=0.3;) 4 - $\bar{R}_T$ =0.1; φ=0.1; 5 - $\bar{R}_T$ =0.01, φ=0.1÷0.5; б) в зависимости от термического сопротивления $\bar{R}_T$ при X =3 (1 - φ=0.1, 2- φ=0.2; 3 - φ=0.3, 4 - φ =1.0).

Литература

[1] Фотеев Н.К. Влияние режимов электроэрозионной обработки на характеристики микрогеометрии поверхностей сталей и сплавов. – Электронная обработка материалов, 1976, №1. с. 5-7.

[2] Фотеев Н.К. Особенности поверхностей, обработанных электроэрозионным способом. – Электронная обработка материалов, 1979, №6. с. 5-8.

[3] Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. - Л.: Энергия, 1980. – 143 с.

[4] Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. - М.: Машиностроение, 1981. – 205 с.

[5] Шанин Ю.И., Федосеев В.Н., Шанин О.И. Влияние неидеальности контакта на теплообмен в компактных теплообменниках. – ИФЖ, 1991, т.60, №5, с. 776-782.