

УДК 621.774.5 : 621.7.044

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ГАЗОДЕТОНАЦИОННОЙ ФУТЕРОВКИ БИСЛОЙНЫХ ТРУБ

К.А. Никитенко, канд. техн. наук, В.К. Борисевич, д-р техн. наук

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрены параметры и методика оценки качества бислойных (биметаллических) труб. Приведена методика выбора размеров трубчатых заготовок и их предельных отклонений по коэффициенту плакирования готовой биметаллической трубы.

* * *

Розглянуто параметри та методика оцінки якості бішарових (біметалевих) труб. Наведено методику вибору розмірів трубчатих заготовок та їх граничних відхилень за коефіцієнтом плакування готової біметалевої труби.

* * *

Quality parameters and methodic of bilayer (bimetal) tubes quality appraisal have been studied. The methodic of dimensions choice and its maximum deviations for tube blanks upon the cladding factor of processed bimetal tube are presented.

Введение. Перспективным является применение в авиационных конструкциях различного назначения и на космических аппаратах биметаллических (мультиметаллических) трубчатых элементов, плакированных жаростойкой сталью, никелевыми сплавами и обладающих высокой удельной жесткостью и усталостной прочностью. Требования, предъявляемые к трубчатым биметаллическим изделиям в авиационной промышленности, довольно высоки и имеют свою специфику. Полиметаллические трубы (трубопроводы) должны иметь высокую точность размеров, качество поверхности и минимум сварных швов. Данные требования должны обеспечиваться технологией производства.

Настоящая работа посвящена анализу технологических возможностей обеспечения требуемого качества производства длинномерных (с отношением длины к внешнему диаметру $L/D > 40$) высокоточных биметаллических труб авиационного назначения; в ней рассмотрены принципы выбора исходных заготовок.

Методика оценки качества труб. Основные требования к качеству биметаллических труб* в за-

висимости от их назначения, изложены в технических условиях на эти трубы. Точность размеров бислойных заготовок для термодиффузионной сварки должна быть не ниже, чем труб после термодиффузионной сварки.

Чтобы оценить точность размеров и качество бислойных труб, необходимо провести количественную оценку по следующим показателям [1]:

- точность размеров слоев после запрессовки (приведенные значения – для труб с наружным диаметром 30...100 мм):
- 1) предельное отклонение по толщине плакирующего слоя – $\pm 15\%$ (цветной металл) или $\pm 30\%$ (коррозионностойкая сталь) для удельной толщины плакирующего слоя (отношение толщины плакирующего слоя к толщине стенки бислойной трубы) 20...40%;
- 2) предельное отклонение по суммарной толщине стенки – $\pm 10\%$;
- 3) предельное отклонение по наружному диаметру – $\pm (0,25 \div 0,40)$ мм или $\pm (0,6 \div 1,0)\%$;
- суммарная площадь контактной поверхности

* Биметаллические трубы состоят из основного и плакирующего слоев, сваренных на границе контакта. Готовые бислойные трубы, в отличие от биметаллических труб, имеют плотный контакт заданной

величины между слоями. Диффузионная связь слоев отсутствует. Бислойная заготовка – трубчатая пара, собранная с зазором между слоями и предназначенная для процесса футеровки.

слоев в бислойной трубе – не менее 60...75%;

– величина контактного давления между слоями в бислойной трубе – максимально допустимая для данного сочетания металлов слоев и размеров труб.

Количественные значения показателей точности размеров слоев приведены для трубопроводов, применяемых в авиационной промышленности. Два последних показателя обусловлены требованием к качеству сварки между слоями в биметаллической трубе. В применяемых на производстве технологиях данные показатели достигаются совместной пластической деформацией слоев, что приводит к снижению точности их размеров в трубе.

Проблема получения бислойной заготовки заданной точности и качества явилась причиной поиска новых способов. Разработанная технология газодетонационной футеровки длинномерных труб [2, 3] позволяет производить бислойные трубы, удовлетворяющие приведенным выше требованиям.

Ранее [3] было рассмотрено влияние технологических параметров процесса футеровки и скорости удара в момент начала совместной деформации слоев на величину контактного давления в трубе. Необходимо установить критерий оптимальности технологического процесса.

Выбор начального зазора. Величина исходного зазора в собранной под футеровку паре должна быть выбрана такой, чтобы обеспечить, в первую очередь, возможность разгона плакирующей оболочки до расчетной скорости [3], при которой ее остаточное пружинение близко к нулю. Данная радиальная скорость оболочки в момент начала совместной деформации слоев обеспечивает не только максимальное контактное давление запрессовки, но и получение площади контактной поверхности, достаточной для последующей сварки слоев (рис. 1).

Так как при прочих равных условиях скоростью соударения можно управлять также, изменяя величину давления футеровки, необходимо выработать

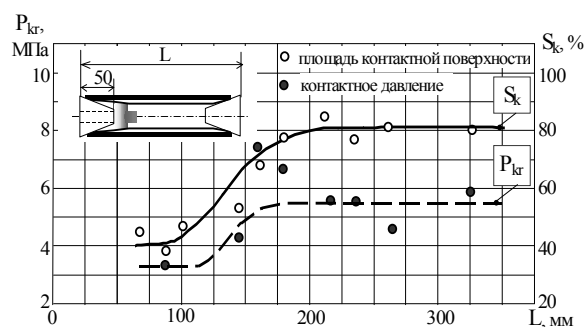


Рис. 1. Распределение контактного давления запрессовки $P_{кр}$ и площади контактной поверхности S_k вдоль образующей бислойной трубы $\varnothing 61 \times 7,5$ мм (сталь – сплав АМг-2М)

критерий, по которому можно было определить, каким именно образом достичь оптимального разгона стенки плакирующей оболочки до необходимой (оптимальной) скорости. Таким критерием может служить требование применения минимального давления футеровки для запрессовки плакирующего слоя на заданную максимальную величину. Этот критерий обусловлен не только требованиями экономики компонентов газовой смеси, но и стремлением ограничить пиковые давления в энергетическом узле установки. Уменьшение величины газового заряда позволяет существенно упростить конструкцию узлов герметизации установки, снизить шумовой эффект детонации.

Максимально возможный начальный зазор при минимальном начальном давлении газового заряда связан с определением максимально допустимых деформаций стенки плакирующей оболочки, при которых обеспечивается ее целостность. Значение критической деформации $v_{кр}$ для оболочки $\varnothing 42 \times 0,75$ мм из алюминиевого сплава АМг-2м было установлено из опыта. Разрушение стенки оболочки начиналось, когда ее радиальное смещение достигало 4 мм. Критическая относительная деформация, определяемая зависимостью [4]

$$\frac{u_{кр}}{r} + \frac{u_{кр}}{r + u_{кр}} = v_{кр}, \quad (1)$$

для указанной оболочки $v_{кр} = 0,350$. Здесь $u_{кр}$ – предельное перемещение стенки оболочки; r – радиус внутренней поверхности оболочки. Из равенства (1)

можно определить величину предельного начального зазора $\delta_{пр} = u_{кр}$:

$$\delta_{пр} = \frac{r}{2} \left[(v_{кр} - 2) + \sqrt{4 + v_{кр}^2} \right]. \quad (2)$$

Было установлено [2], что величина оптимального зазора, на котором стенка оболочки успевает достичь максимальной скорости при заданном давлении футеровки, составляет 30...60% от ее максимального перемещения до разрушения. Таким образом, за оптимальную деформацию оболочки $v_{опт}$, с погрешностью не более 4% (при $u/r < 0,1$), можно принять $v_{опт} = (0,3 \dots 0,6) \cdot v_{кр}$. Оптимальную величину зазора можно определить по формуле (2), заменив в ней $v_{кр}$ на $v_{опт}$ для произвольного радиуса оболочки. Заметим, что формула (2) не учитывает упрочнение металла в процессе деформирования.

Выбор размеров заготовок. При обработке технологии газодетонационной футеровки труб установлено, что номинальные размеры основного слоя не изменяются и находятся практически в таком же поле допуска, как у исходной заготовки. Размеры трубчатой заготовки для основного слоя – внешний диаметр D_1 и толщину стенки трубы h_1 – можно задавать равными размерам готовой трубы.

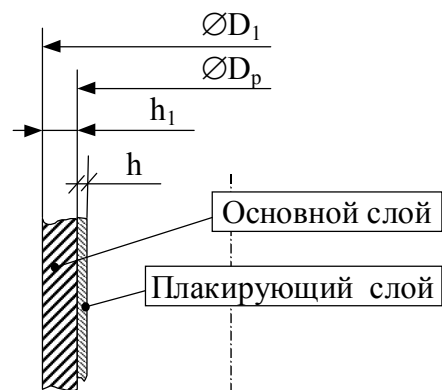
Задача состоит в подборе размеров сечения плакирующей заготовки – внешнего диаметра D_2 и толщины оболочки h_2 (рис. 2). Эта задача должна рассматриваться с учетом размеров основного слоя и толщины необходимого плакирующего слоя h . При этом в расчете необходимо учитывать значения оптимального начального зазора между слоями.

Из условия сохранения площади сечения плакирующей оболочки и условия геометрической совместности размеров сечений плакирующей и плакируемой заготовок получим систему уравнений [4]

$$\left. \begin{aligned} D_2^2 - (D_2 - 2h_2)^2 &= (D_1 - 2h_1)^2 - (D_1 - 2h_1 - 2h)^2, \\ D_2 - 2h_2 + 2u &= D_1 - 2h_1 - 2h \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

которая дополняется выражением для оптимальной величины перемещения стенки оболочки

Бислойная труба



Бислойная заготовка

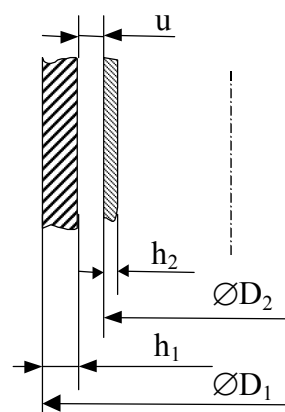


Рис. 2. Схема размеров

$$u_{онм} = \frac{r}{2} \left[(\kappa v_{кр} - 2) + \sqrt{4 + (\kappa v_{кр})^2} \right], \quad (4)$$

где $r = \frac{D_2 - 2\delta_2}{2}$; $\kappa = 0,45$ – поправочный коэффициент на величину деформации [3].

В результате решения системы уравнений (3) совместно с уравнением (4) получим выражения для размеров плакирующей заготовки:

$$D_2 = 2 \sqrt{\frac{(D_1 - 2h_1 - 2h)^2}{(\kappa v_{кр} + \sqrt{4 + (\kappa v_{кр})^2})^2} + h(D_1 - 2h_1) - h^2}, \quad (5)$$

$$h_2 = - \frac{D_1 - 2h_1 - 2h}{\kappa v_{кр} + \sqrt{4 + (\kappa v_{кр})^2}} + \frac{D_2}{2}. \quad (6)$$

Трубчатую заготовку плакирующего слоя выбирают в соответствии со стандартами на сортамент выпускаемых труб. Размеры заготовки D_2 и h_2 – ориентировочные. Окончательные размеры диаметра

$D_{2 \text{ расч}}$ и толщины стенки заготовки $h_{2 \text{ расч}}$ принимаем в соответствии с сортаментом выпускаемых моно-металлических труб по ГОСТу в диапазоне размеров заготовки лакирующего слоя D_2 и h_2 , соответствующем предельному изменению коэффициента k : $k = 0,3$ для $D_{2 \text{ max}}$ и $h_{2 \text{ min}}$; $k = 0,6$ для $D_{2 \text{ min}}$ и $h_{2 \text{ max}}$ [3]. Толщину лакирующего слоя $h = h_{\text{расч}}$ пересчитываем по зависимости (5) с учетом принятых размеров.

По ГОСТам и техническим условиям регламентируется не толщина лакирующего слоя, а коэффициент плакирования и его предельные отклонения. Этот коэффициент выражает отношение площади поперечного сечения лакирующего слоя к общей площади поперечного сечения трубы. При производстве труб из бислойных заготовок при установленном процессе деформации слоев коэффициент плакирования остается постоянным. Это дает возможность вести расчеты размеров заготовок слоев по известным размерам готовых труб. Чтобы готовая труба удовлетворяла требованиям по толщине лакирующего слоя, надо коэффициент плакирования n_r брать соответствующим критическим значениям лакирующего слоя $t_{\text{пл кр}} \geq t_{\text{пл min}} + \Delta_r$, где $t_{\text{пл min}}$ – минимальная допустимая толщина лакирующего слоя, а Δ_r – возможное отклонение толщины лакирующего слоя от номинального значения, которое характеризуется способом производства труб: $\Delta_r = 0,05 \dots 0,1$ мм – при термодиффузионной сварке с последующим холодным переделом; $\Delta_r = 0,2 \dots 0,4$ мм – при прокатке.

Зная предъявляемые к готовым трубам требования по точности лакирующего слоя, определяем минимальные n_{min} и максимальные n_{max} коэффициенты плакирования

$$n_{\text{min}} = n_r - \Delta n_r, \quad n_{\text{max}} = n_{\text{min}} + 2\Delta n_{\text{доп}},$$

где Δn_r – отклонение коэффициента плакирования от оптимального значения n_r , соответствующее величине возможных отклонений толщины лакирующего слоя от номинального значения в зависимости от способа получения биметаллической тру-

бы; $\Delta n_{\text{доп}}$ – отклонение коэффициента плакирования от номинального значения, соответствующее половине поля допуска на толщину лакирующего слоя. По ТУ 14-3-672 – 78 колебания номинального коэффициента плакирования n , равного 0,23, составляют $\pm 30\%$.

Расчетное значение коэффициента плакирования $n_{\text{расч}}$, найденное для толщины лакирующего слоя $h_{\text{расч}}$, должно удовлетворять условию

$$n_{\text{max}} \geq n_{\text{расч}} \geq n_{\text{min}}. \quad (7)$$

Если это условие выполняется, расчетные размеры диаметра и толщины стенки заготовки лакирующего слоя принимаются как окончательные. В противном случае эти размеры уточняются.

Точность размеров заготовки. Требования к точности размеров готовой биметаллической трубы известны уже на стадии проектирования технологического процесса. Это позволяет рассчитать предельные отклонения размеров трубы-заготовки лакирующего слоя по зависимостям для минимального и максимального коэффициентов плакирования бислойной трубы-заготовки

$$n_{\text{min}} \leq n_{\text{э min}} = \frac{(h_{\text{расч}} - \Delta h) [(D_p - \Delta D_p) - (h_{\text{расч}} - \Delta h)]}{(h_1 + \Delta h_1 + h_{\text{расч}} - \Delta h) [(D_1 + \Delta D_1) - (h_1 - \Delta h_1 - h_{\text{расч}} + \Delta h)]}, \quad (8)$$

$$n_{\text{max}} \geq n_{\text{э max}} = \frac{(h_{\text{расч}} + \Delta h) [(D_p - \Delta D_p) - (h_{\text{расч}} + \Delta h)]}{(h_1 - \Delta h_1 + h_{\text{расч}} - \Delta h) [(D_1 - \Delta D_1) - (h_1 - \Delta h_1 + h_{\text{расч}} + \Delta h)]}, \quad (9)$$

где Δh , Δh_1 – предельные отклонения толщины лакирующего и основного слоев соответственно; ΔD_p , ΔD_1 – предельные отклонения диаметра лакирующего слоя и наружного диаметра бислойной трубы соответственно.

$$D_p = D_{p \text{ ном}} + 2\Delta, \quad (10)$$

где $D_{p \text{ ном}}$ – номинальный разделительный диаметр слоев в бислойной трубе; Δ – остаточное смещение внутренней поверхности основного слоя после фу-

теровки, равное величине создаваемого натяга в бислойной трубе

$$\Delta = P_{kr} \frac{D_{p\text{ ном}}}{E} \left(\frac{D_1^2 + D_{p\text{ ном}}^2}{D_1^2 - D_{p\text{ ном}}^2} + \mu \right), \quad (11)$$

где P_{kr} – контактное давление запрессовки, выбираемое максимально возможным для данного сочетания материалов слоев [2]; E – модуль упругости материала основного слоя; μ – коэффициент Пуассона.

Пользуясь формулой (8), методом последовательных приближений задают предельные отклонения на толщину плакирующего и основного слоев заготовки. Кроме того, пользуясь выражением (9), задают верхние предельные отклонения плакирующего слоя и нижние – основного слоя бислойной трубы. Предельные отклонения номинальных размеров труб-заготовок слоев принимают равными соответствующим отклонениям размеров слоев в бислойной трубе.

Некоторые замечания. При больших отклонениях от номинальных размеров и значительной овальности толстостенных заготовок основного слоя происходит неравномерная запрессовка плакирующей оболочки. Во избежание этого необходима предварительная калибровка толстостенной трубы основного слоя. Точность размеров калиброванной трубы определяется точностью исходных размеров, свойствами материалов и другими факторами и обеспечивает отклонение по диаметру в пределах 0,2...0,3 мм.

Выбор термодиффузионного способа производства биметаллических труб позволяет снизить расход плакирующего металла путем обеспечения более высокой точности размеров по сравнению с другими методами производства труб.

Выводы

1. Задача поиска технологии производства труб для авиации сводится к разработке процесса

получения качественной бислойной заготовки с заданной точностью размеров слоев.

2. Рассмотренный алгоритм выбора размеров и их предельных отклонений для исходных трубчатых заготовок слоев в технологическом процессе газодетонационной футеровки длинномерных труб позволяет получать бислойные трубы (заготовки), удовлетворяющие необходимым требованиям точности. Выбор начального зазора в бислойной паре по приведенным зависимостям позволяет снизить рабочее давление футеровки и добиться максимальной площади контакта слоев.

Литература

1. Чепурко М.И. и др. Производство биметаллических труб и прутков. - М.: Металлургия, 1986. - 240 с.
2. Никитенко К.А., Борисевич В.К., Бакаев С.Н. Установка для производства длинномерных биметаллических труб МИРТ-1 // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні і металургії: Темат. зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА. – 2001. – С. 13-16.
3. Никитенко К.А., Борисевич В.К. Технология газодетонационной футеровки длинномерных бислойных труб // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. – 2002. – Вып. 27(4). – С. 63-74.
4. Производство биметаллических труб и трубных изделий с применением энергии взрыва/ Е.А. Близиюков, Н.П. Юрченко, А.В. Гусакова, Л.С. Амелина /Ин-т “Черметинформация”. - М., 1991. - 55 с.

Поступила в редакцию 24.03.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Тараненко М.Е., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; канд. техн. наук, доцент Савченко Н.Ф., Харьковский Государственный экономический университет, г. Харьков.