

УДК 673.15; 539.31

DOI 10.17073/0021-3438-2015-1s-46-49

## ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МЕДНЫХ И ЛАТУННЫХ ТРУБАХ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ

© 2015 г. **Г.В. Шимов, Д.С. Ковин**

Уральский федеральный университет (УрФУ)

им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Проведено моделирование процесса финишного короткооправочного волочения труб из латуни Л96 размером 8,0×0,2 мм. Рассчитаны распределения осевых остаточных напряжений по стенкам труб с помощью методики, использующей метод «расчленения тел» с учетом условия «совместности». Незначительные расхождения расчетов и результатов моделирования свидетельствуют о том, что предлагаемая методика адекватно описывает процесс возникновения в стенках труб остаточных напряжений и может применяться для оценки их уровня.

**Ключевые слова:** медные и латунные трубы, волочение, остаточные напряжения, коррозионное растрескивание, методика расчета, распределение напряжений, температурное расширение, упругая релаксация.

There was conducted simulation of process of final fixed plug drawing relating to tube from brass L96 with dimensions 8,0×0,2 mm. There were calculated residual stresses distribution on pipes walls with the aid of procedure that used method of «dissection of solids», taking into account condition of «conformity». Insignificance discrepancies of calculations and results of stimulation testified that offered procedure is adequately described process of residual stresses occurrence in tubes walls, and could be applied for the assessment of its level.

**Keywords:** copper and brass tubes, drawing, residual stresses, stress-corrosion fracture, calculation procedure, distribution of stresses, thermal expansion, elastic relaxation.

### Введение

Холоднодеформированные медные сплавы могут растрескиваться без каких-либо внешних факторов, часто даже при хранении их на складе. Особенно резко склонность к самопроизвольному трещинообразованию выражена у латуни [1]. Достаточно очень слабого коррозионного воздействия, например загрязнения атмосферы небольшим количеством аммиака или сернистого газа, чтобы вызвать растрескивание латунных труб, особенно в условиях их нагружения [2, 3]

Традиционная технологическая схема производства латунных труб для теплообменных аппаратов, характерная для отечественных заводов цветной металлургии, включает на финишной стадии волочение на короткой оправке или без оправки и светлый отжиг. В процессе волочения в стенке трубы формируется определенное распределение остаточных напряжений, которое при последующей термической обработке (ТО) может приводить к искривлению труб и их растрескиванию. ТО не гарантирует полной релаксации остаточных напря-

жений, а в некоторых случаях после отжига в бунтах при размотке в витках труб могут возникать еще большие растягивающие остаточные напряжения [4]. Кроме того, часть труб — как медных, так и латунных, например трубки радиаторные, изготавливаемые по ГОСТ 529, поставляются в твердом состоянии, т.е. без проведения финишной ТО.

В соответствии с существующей нормативной документацией в ОАО «Ревдинский завод по обработке цветных металлов» (г. Ревда) трубы латунные для теплообменных аппаратов подвергаются контролю на наличие растягивающих остаточных напряжений методом аммиачной пробы в соответствии с ГОСТ 21646-2003. Суть испытаний заключается в выдержке образцов труб в растворе хлористого аммония и их визуальном осмотре по истечении определенного времени. При отсутствии на поверхности труб продольных трещин испытание считается пройденным.

Необходимо отметить, что применяемый способ

*Шимов Г.В. — ассистент кафедры обработки металлов давлением УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19).  
Тел.: (343) 375-46-24. E-mail: geosh@bk.ru.*

*Ковин Д.С. — магистрант этой же кафедры. E-mail: wertlos@mail.ru.*

не обеспечивает высокой достоверности результатов. Его главный недостаток состоит в том, что не отображается полная картина распределения остаточных напряжений по стенке трубы, а также не выявляется уровень остаточных напряжений 1-го и 2-го рода. Отсутствие продольных трещин на наружной поверхности труб после испытания свидетельствует лишь о невысоком уровне растягивающих напряжений в поверхностном слое, однако не характеризует состояние внутренней поверхности трубы, где напряжения могут достигать больших значений, снижая ее эксплуатационную стойкость [5, 6]. Следует учитывать, что на коррозионную стойкость влияют как тангенциальные, так и осевые остаточные напряжения.

Существует множество методик измерения уровня остаточных напряжений. Так, широкое распространение получил метод кольцевой пробы [7]. Однако он имеет ряд недостатков, например не дает полной информации о напряженном состоянии. В частности, определяются только усредненные по толщине стенки значения тангенциальных напряжений. По результатам этих измерений невозможно установить их величину в поверхностном слое, в то время как именно поверхностные растягивающие напряжения провоцируют развитие коррозии [8, 9]. К тому же если эпюра тангенциальных напряжений симметрична относительно средней линии сечения трубы, то после разрезки кольца его диаметр не изменяется, и будет сделан вывод об отсутствии напряжений. На самом же деле большие остаточные напряжения могут быть уравновешены по изгибающему моменту, и метод кольцевой пробы покажет их отсутствие.

Целью работы являлась разработка аналитической методики расчета распределения остаточных напряжений в стенке труб с учетом релаксации трубы после выхода из очага деформации.

## Методика исследования распределения остаточных напряжений

Для теоретического анализа распределения остаточных напряжений в прутках и трубах известен метод «расчленения тел» [7], когда труба представляется в виде совокупности вставленных друг в друга цилиндров, имеющих толщину стенки  $h_i = h/n$ , где  $h$  — толщина стенки трубы,  $n$  — число слоев.

Было проведено компьютерное моделирование процесса волочения на короткой оправке с использованием программного комплекса DEFORM и по-

лучена информация о распределении степени деформации и температуры по сечению стенки трубы. Задача была решена в упругопластической постановке, что позволило проследить упругие нагрузки в очаге деформации, а также увидеть поле остаточных напряжений. Форма инструмента и граничные условия при постановке задачи были максимально приближены к реальным. Кроме этого учитывались температурные зависимости модуля упругости и коэффициента температурного расширения. Сетка конечных элементов была подобрана таким образом, чтобы стенку трубы было удобно разбить на «слои». Распределение степени деформации по стенке трубы представлено на рис. 1.

Волочение осуществлялось со скоростью 145 м/мин при коэффициенте трения  $\mu = 0,06$  с вытяжкой 1,44. Коэффициент теплопередачи от трубы к волоке принят равным  $\alpha = 10$  кВт/(м<sup>2</sup>·К), а коэффициент конвективной теплоотдачи —  $\alpha_k = 50$  кВт/(м<sup>2</sup>·К).

На рис. 2 приведено распределение осевых остаточных напряжений по стенке трубы после волочения, полученное при моделировании в DEFORM.

Решение задачи с разными граничными условиями показало, что при увеличении обжатия, как и при увеличении коэффициента трения, градиент степени деформации и температуры по сечению стенки трубы возрастает. Контактное трение в первую очередь разогревает поверхность, что повышает уровень растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях при тепловой разгрузке трубы.

Рассчитаем распределение остаточных напряжений теоретически и сравним с результатами моделирования. Суть релаксации заключается в том,

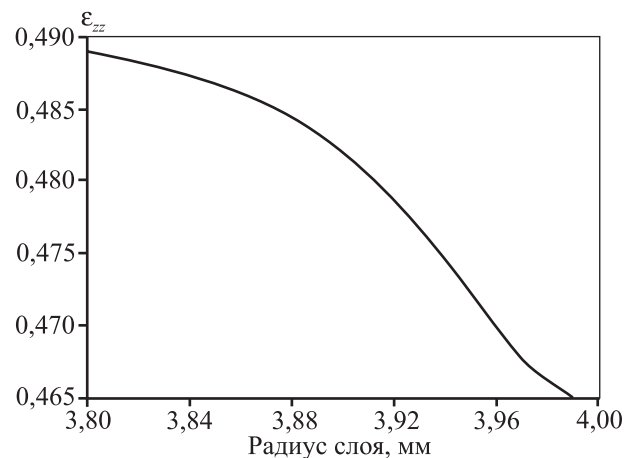
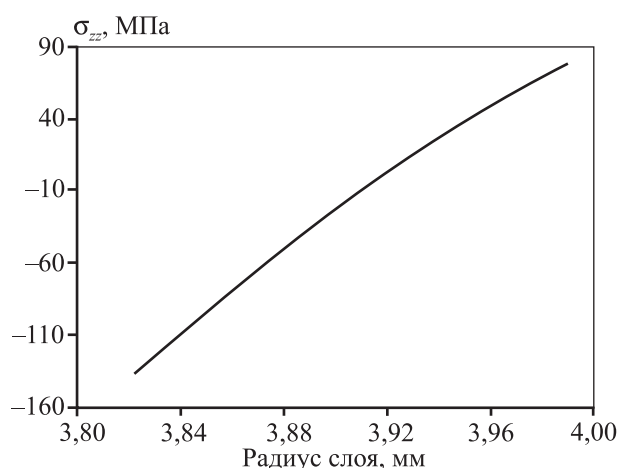


Рис. 1. Распределение степени деформации по стенке трубы размером 8,0×0,2 мм из латуни Л96 после волочения

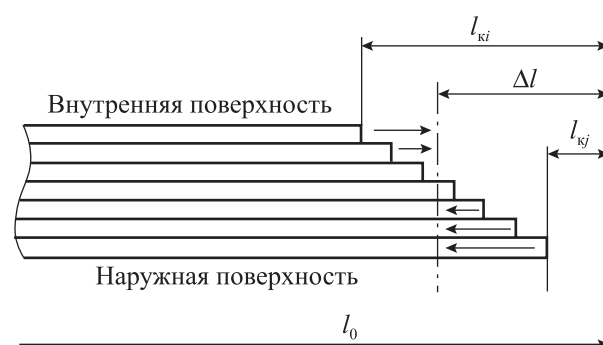


**Рис. 2.** Распределение осевых остаточных напряжений по стенке трубы размером 8,0×0,2 мм из латуни Л96 после волочения по данным DEFORM

что, поскольку слои связаны друг с другом, деформация одного слоя неизбежно приводит к деформации соседних слоев. Для того чтобы методика и модель релаксации в целом были правильными, введем условие одновременной деформации слоев. Оно хорошо иллюстрируется стержневой системой, когда два одинаковых стержня жестко крепятся торцами между двумя параллельными планками. При этом температура одного стержня, например, больше, чем другого. При температурной релаксации стержень с более высокой температурой будет стремиться укоротиться сильнее, а второй будет ему препятствовать. В результате после охлаждения в первом стержне возникнут сжимающие осевые остаточные напряжения, а во втором — растягивающие [7].

Рассмотрим процесс релаксации трубы, состоящей из слоев, имеющих различные температуры и степени деформации. В момент выхода из волоки представим трубу как систему слоев, подвергающуюся деформационной и температурной релаксации. Схема релаксации показана на рис. 3. Для оценки уровня остаточных напряжений в слоях необходимо знать конечную длину трубы после релаксации  $l_1 = l_0 - \Delta l$ . Искомой величиной назовем абсолютное изменение длины трубы  $\Delta l$ .

При постановке задачи учтем, что внутренние слои после волочения на короткой оправке имеют большую степень деформации и разогреваются сильнее, чем внешние, из-за действия сил трения. Таким образом, внутренние слои в момент выхода трубы из волоки укорачиваются интенсивнее наружных. Изменение длины слоя после выхода тру-



**Рис. 3.** Схема релаксации трубы по методу «расчленения тел» с учетом условия «совместности деформации» слоев

бы из волоки без учета совместности деформации составит

$$l_{ki} = l_0 \left( \frac{\sigma_{si}}{E_i} + \beta_i \Delta t_i \right), \quad l_{kj} = l_0 \left( \frac{\sigma_{sj}}{E_j} + \beta_j \Delta t_j \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{si}/E_i$ ,  $\sigma_{sj}/E_j$  — упругая релаксация соответственно  $i$ -го и  $j$ -го слоев;  $\Delta t_i$ ,  $\Delta t_j$  — разность между начальной и конечной температурами релаксации  $i$ -го и  $j$ -го слоев;  $l_0$  — начальная длина трубы;  $\beta_i$ ,  $\beta_j$  — коэффициенты температурного расширения  $i$ -го и  $j$ -го слоев.

Учтем тот факт, что слои связаны друг с другом, поэтому внутренние упруго «тянутся» наружными слоями, а наружные, в свою очередь, упруго «сжимаются» внутренними. В результате длина всех слоев составит  $l_1 = l_0 - \Delta l$ .

Зададим ориентировочное значение  $\Delta l$  исходя из средней длины слоев после релаксации, для того чтобы можно было условно разделить слои на «удлиняющиеся» (обозначим их индексом  $i$ ) и «укорачивающиеся» (обозначим их индексом  $j$ ). Тогда относительная деформация (удлинение) слоев, длина которых  $(l_0 - l_{ki})$  меньше, чем  $l_1$ , будет равна

$$e_i = (l_{ki} - \Delta l) / (l_0 - l_{ki}). \quad (2)$$

Аналогично, относительная деформация (укорочение) слоев, длина которых  $(l_0 - l_{kj})$  больше, чем  $l_1$ , составит

$$e_j = (\Delta l - l_{kj}) / (l_0 - l_{kj}). \quad (3)$$

Переходя от деформаций к силам  $P_i$  и  $P_j$ , действующим в системе, получаем условие равновесия:

$$\sum_{i=1}^n e_i F_i E_i = \sum_{j=1}^n e_j F_j E_j, \quad (4)$$

где  $F_i$  и  $F_j$  — площади поперечного сечения «удлиня-

ющихся» и «укорачивающихся» слоев соответственно,  $E_i$  и  $E_j$  — модули упругости для этих слоев.

Подставив выражения (1)—(3) в формулу (4), получаем

$$\sum_{i=1}^n \frac{l_0 \left( \frac{\sigma_{si}}{E_i} + \beta_i \Delta t_i \right) - \Delta l}{l_0 - l_0 \left( \frac{\sigma_{si}}{E_i} + \beta_i \Delta t_i \right)} F_i E_i =$$

$$= \sum_{j=1}^n \frac{\Delta l - l_0 \left( \frac{\sigma_{sj}}{E_j} + \beta_j \Delta t_j \right)}{l_0 - l_0 \left( \frac{\sigma_{sj}}{E_j} + \beta_j \Delta t_j \right)} F_j E_j. \quad (5)$$

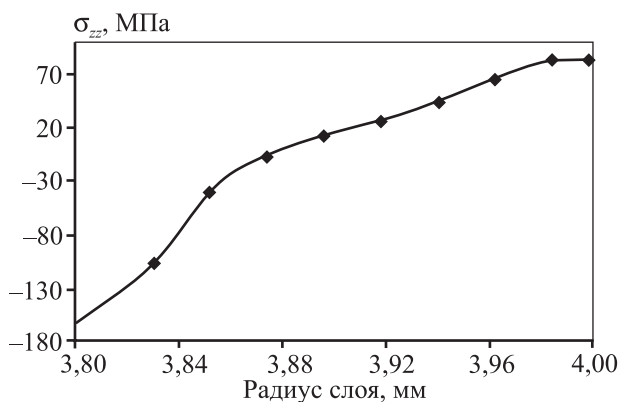
Из условия равновесия находим абсолютное укорочение или удлинение трубы  $\Delta l$ . Зная  $\Delta l$ , несложно определить истинную относительную деформацию слоев, подставив найденное значение  $\Delta l$  в выражения (2) и (3), и упругие остаточные напряжения в каждом слое по отдельности по формулам

$$\sigma_i = (-\beta_i t_i + e_i) E_i, \quad \sigma_j = (-\beta_j t_j + e_j) E_j. \quad (6)$$

## Обсуждение результатов расчета

Распределение осевых остаточных напряжений по стенке трубы, рассчитанное по данной методике, представлено на рис. 4.

Далее можно рассчитать распределение радиальных и тангенциальных остаточных напряжений по известной методике [10]. Анализируя полученные распределения на рис. 2 и 4, можно сделать вывод,



**Рис. 4.** Распределение осевых остаточных напряжений по стенке трубы размером 8,0×0,2 мм из латуни Л96 с учетом условия «совместности деформации»

что ошибка расчета по сравнению с моделированием не превышает 4 %. Полная информация о величине, знаке и характере распределения остаточных напряжений в медных и латунных трубах дает возможность правильно оценивать эксплуатационную надежность продукции, а также позволяет рассматривать технологические процессы производства более разнопланово.

## Заключение

Таким образом, проведено математическое моделирование процесса финишного волочения и рассчитано поле остаточных напряжений в стенке труб размером 8,0×0,2 мм из латуни Л96. Предложена методика расчета, позволяющая несложным способом определять полное распределение остаточных напряжений по стенке трубы. Результаты расчета с высокой точностью совпадают с результатами моделирования. Можно считать, что модель и методика расчета корректно описывают процесс релаксации и пригодны для определения остаточных напряжений в трубах и прутках.

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 11.1369.2014/К от 18.07.2014 (номер государственной регистрации 114122470051).*

## Литература

1. Lawrence S.J., Bodnar R.L. // Adv. Mater. Process. 1997. Vol. 151, № 2. P. 29.
2. Mori G. // Corros. Sci. 2005. Vol. 47, № 9. P. 2099.
3. Rao T.S., Nair K.V.K. // Ibid. 1998. Vol. 40, № 11. P. 1821.
4. Мочалов Н.А., Белов М.И., Маслов С.Н. // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2002. № 1. С. 24.
5. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981.
6. Tropotov A.V. // Met. Sci. Heat Treat. 2006. Vol. 48, № 1-2. P. 31.
7. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963.
8. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. М.: Машгиз, 1963.
9. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: Теория и приложения. М.: Наука, 1982.
10. Буркин С.П., Шимов Г.В. // Сталь. 2012. № 5. С. 72.