УДК 621.774

# ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕДНЫХ ТРУБ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

© 2014 г. Ю.Н. Логинов, М.С. Шалаева

Уральский федеральный университет (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 16.11.12 г., подписана в печать 14.01.13 г.

Рассмотрена эволюция микронеровностей внутренней поверхности медных труб при волочении. Применена методика измерения параметра шероховатости  $R_{\alpha}$  на внутренней поверхности труб после прессования и после волочения. Выявлено, что наименьшая величина  $R_{\alpha}$  наблюдается у горячепрессованных труб. При деформации волочением до логарифмической степени деформации 0,417 происходит нарастание среднего параметра  $R_{\alpha}$  от 0,20 до 6,16 мкм, т.е. примерно в 30 раз. Наибольший темп прироста  $R_{\alpha}$  отмечен в первом проходе волочения, установлено также нарастание дисперсии измеряемой величины по проходам волочения. Наблюдаемое явление объясняется эффектом разворота зерен меди.

Ключевые слова: медь, трубы, волочение, шероховатость, качество поверхности.

There was considered evolution of Microroughnesses of an internal surface of copper pipes under drawing. There was employed procedure of measurement such parameter as roughness  $R_{\alpha}$  on internal surface of pipes after extrusion and after drawing. It was revealed that minimum value  $R_{\alpha}$  is observed for hot extruded pipes. At deformation of drawing until logarithmic quotient 0,417 there is increase of average parameter  $R_{\alpha}$  from 0,20 to 6,16  $\mu$ m, i.e. approximately in 30 times. The greatest rate of  $R_{\alpha}$  increase was noted in the first pass of drawing, as well established increase of dispersion of measured value on drawing passes. The observable phenomenon is explained by means of a turn of copper grains.

**Keywords:** copper, pipes, drawing, roughness, surface quality.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Состояние внутренней поверхности труб является одной из важных характеристик их качества, поскольку именно по каналу трубы происходит движение жидкости или газа. От чистоты этой поверхности зависит сопротивление перемещению этих сред. Трудность оценки состояния внутренней поверхности труб, малого диаметра, например капиллярных медных труб, заключается в отсутствии методов постоянного мониторинга. Действительно, наружную поверхность трубы можно контролировать визуально, а о состоянии внутренней — чаще всего судят на основе выборочных тестов по продольным темплетам.

Описанию взаимодействия поверхности инструмента с пластически деформируемым материалом с заданной шероховатостью посвящен ряд работ [1, 2]. В статьях [3, 4] затронут аспект изменения шерохо-

ватости на свободной поверхности заготовки при ее растяжении.

В работе [5] описаны методики оценки состояния полости труб, используемых в атомной промышленности. Показан большой спектр проблем в этой области, включая анизотропию шероховатости и сложный статистический характер измерений. В технологическом плане предложено применять струйное травление для улучшения показателей шероховатости полости труб.

Авторы [6] из института Rochester Institute of Technology сравнивали параметры шероховатости при одних и тех же методах обработки для меди, латуни, алюминия, нержавеющей стали и никеля, в том числе применительно к капиллярным трубам. Отмечено, что для исследования профилометрами такие трубы имеют слишком малый размер отверс-

**Логинов Ю.Н.** – докт. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). Тел.: (343) 375-46-24. E-mail: unl@mtf.ustu.ru.

Шалаева М.С. – аспирант этой кафедры. E-mail: shalaevams@mail.ru.

тия, поэтому поверхность изучали методом цифровой микроскопии (digital microscope), позволяющим достичь большой глубины резкости при сканировании криволинейных поверхностей. По сравнению с латунными трубами, медные отличала меньшая шероховатость внутренней поверхности. Таким образом, вид материала трубы сказывается на чистоте поверхности.

Шероховатость труб малых размеров из нитинола изучали японские специалисты из организаций Department of Precision Mechanics, School of Engineering, Tokai University и Department of Research and Development, Tokin Co., Ltd [7]. Они установили, что безоправочное волочение труб приводит к ухудшению качества внутренней поверхности труб, особенно при обжатиях выше 15 %.

Таким образом, литературный обзор выявил постоянный интерес исследователей к обозначенной проблеме, а также тот факт, что состояние внутренней поверхности труб зависит от многих параметров.

Целью работы являлось выявление факторов, влияющих на состояние внутренней поверхности медных труб.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

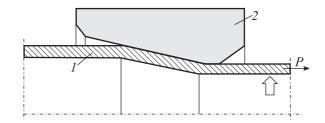
На гидравлическом прессе максимальным усилием 31,5 МН отпрессовали безокислительным методом в воду и с вакуумированием полости трубную заготовку внешним диаметром 46 мм, внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенки 3 мм. Применяли сплошной слиток, а полость в трубной заготовке создавали методом прессовой прошивки иглой прошивной системы. Материал иглы — сталь 3X3M3Ф, смазка иглы — нефтебитум и графит марки ГЭ1 зольностью не более 10 %.

Металлографическим методом установлено, что размер зерна находится в диапазоне 40—120 мкм.

Затем заготовку подвергали волочению на цепном волочильном стане линейного типа ВЦ-8 со смазкой наружной поверхности мыльной эмульсией в три прохода без оправки. Материал волоки — твердый сплав ВК8, рабочий канал волоки полирован. Схема волочения с указанием последующего места измерения шероховатости показана на рис. 1.

Наружный диаметр измеряли штангенциркулем ШЦ-I-125-0,1-2 по ГОСТ 166-89 (предел допустимой погрешности  $\pm 0,1$  мм), толщину стенки труб — микрометром МТ25-2 по ГОСТ 6507-90 (цена деления 0,01 мм, предел допустимой погрешности  $\pm 0,004$  мм). Рассчитывали среднюю толщину стенки как среднее арифметическое между ее максимальным и минимальным значениями в одном сечении. Внутренние диаметры вычисляли с учетом среднего внешнего диаметра и средней толщины стенки.

Маршрут волочения и технологические параметры процесса приведены в табл. 1, где номер прохода 0 соответствует прессованному состоянию;  $D_{\rm H}$  и  $D_{\rm B}$  — наружный и внутренний диаметры трубы; S — средняя толщина стенки; F — площадь поперечного сечения трубы;  $\lambda_D = (D_{i-1} - S_{i-1})/(D_i - S_i)$  — коэффициент вытяжки по диаметру;  $\lambda_S = S_{i-1}/S_i$  — коэффициент вытяжки по стенке;  $\lambda_F = F_{i-1}/F_i$  — коэффициент вытяжки по площади;  $\epsilon_\Sigma = 100(F_0/F_i - 1)/(F_0/F_i)$  — суммарное относительное обжатие по площади;  $\epsilon$ 



**Рис. 1.** Схема безоправочного волочения силой P трубной заготовки I через отверстие волоки 2 с указанием места измерения шероховатости (белая стрелка)

Таблица 1 Технологические параметры экспериментального волочения

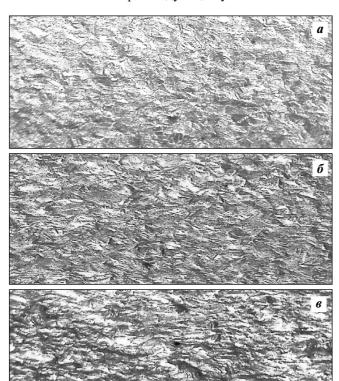
Номер	$D_{{ ext{H}}i}$ , мм	$D_{{ ext{B}}i}$ , мм	$S_i$ , мм	$S/D_{ m H}$	$F_i$ , mm <sup>2</sup>	Коэффициент вытяжки					
прохода волочения						$\lambda_D$	$\lambda_S$	$\lambda_S/\lambda_D$	$\lambda_F$	$\epsilon_{\Sigma}, \%$	ε
0	46,0	39,94	3,03	0,07	409,03	_	_	_	_	0	0
1	39,2	32,81	3,20	0,08	361,40	1,19	0,95	0,79	1,13	12	0,124
2	32,9	26,03	3,44	0,10	317,97	1,22	0,93	0,76	1,14	22	0,128
3	27,9	20,86	3,52	0,13	269,60	1,21	0,98	0,81	1,18	35	0,165

 $= \ln \lambda_F$  — степень деформации (логарифмическая, частная за проход).

По классификации [8] трубы с соотношением  $S/D_{\rm H}=0.05\div0.12$  отнесены к категории нормальных, — как видно из табл. 1, этот диапазон был перекрыт с некоторым превышением в сторону класса толстостенных труб.

Фотографии внутренней поверхности труб приведены на рис. 2. Можно отметить нарастание микронеровностей поверхности по проходам волочения.

Для подтверждения этого факта выполнены измерения шероховатости поверхности внутреннего канала труб с использованием профилометра модели 170622 степенью точности 2 по ГОСТ 19300-86. Принцип действия профилометра — электронный, метод измерения — контактный: происходит ощупывание неровностей исследуемой поверхности алмазной иглой и преобразование возникающих при этом механических колебаний щупа в изменения электрического сигнала пропорционально этим колебаниям. Измерения проводили вдоль направления волочения при следующих условиях: отсечка



**Рис. 2.** Внутренняя поверхность труб после безоправочного волочения (×32)

 $\pmb{a}$  — после первого прохода;  $\pmb{\delta}$  — после второго;  $\pmb{s}$  — после третьего

шага — 0.8 мм, трасса укорочена (равна двум отсечкам шага). Для пресс-заготовки предел измерений назначили 10 мкм, погрешность  $\pm 0.011$  мкм, а для тянутых труб после 2-го и 3-го проходов предел измерений выбран 100 мкм, погрешность  $\pm 0.11$  мкм.

Объем выборки составил 360 измерений для холоднотянутых труб и 16 — для прессованной заготовки. Определяли параметр  $R_a$  по ГОСТ 2789, он описывает среднее на базовой длине l арифметическое отклонение профиля поверхности как среднее значение расстояния  $y_i$  от средней линии для n точек измеренного профиля. При координатной форме измерений координаты берутся по модулю, поэтому значение параметра  $R_a$  оказывается всегда положительным. Сам параметр  $R_a$  не учитывает частоты колебаний профиля поверхности:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{0}^{l} |y| dx,$$

или

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_i| dx,$$

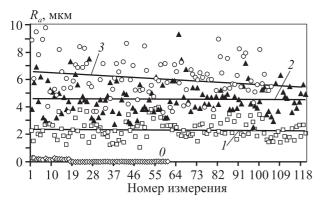
т.е. он является амплитудной характеристикой.

Методика подготовки образцов включала разделение вдоль на две половины отрезка трубы длиной 100 мм, при этом на каждой из внутренних поверхностей половин проводили свое измерение.

# ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 3 отображены результаты измерений. Несмотря на значительный разброс их значений, из графика видно, что по мере деформации заготовки с каждым проходом параметр шероховатости нарастает. Большой разброс значений связан со случайной амплитудой выступов на поверхности (см. фото на рис. 2). Бугристый характер поверхности объясняется разворотом зерен меди при пластической деформации. При этом, в отличие от оправочного волочения, в рассмотренном случае деформации не существует инструмента для разглаживания этой поверхности.

Для отбрасывания резко выделяющихся (аномальных) результатов испытания был применен критерий Смирнова. Результаты статистического анализа шероховатости внутреннего канала труб представлены в табл. 2, где у номера образца (0.1—3.2) первая цифра означает номер прохода, а вторая — первую или вторую половину образца. Такая нуме-



**Рис. 3.** Разброс значений шероховатости по группам измерений

 $\theta$  — для прессованной заготовки (♦);  $I(□), 2(\blacktriangle), 3(○)$  — для холоднотянутой заготовки по соответствующим номерам проходов Линии I—3 — линейная аппроксимация значений

рация позволяла отследить различие в шероховатости одного и того же участка трубы, но в оппозитных поверхностях.

Для проверки существенности отличий средних значений  $R_a$  в соседних проходах был выполнен дисперсионный анализ, который показал, что для 1-го и 2-го проходов волочения статистика Стьюдента t=-19, что больше по модулю табличного значения  $t_m=1,97$ , т.е. различия статистически значимы. Аналогично, при сравнении 2-го и 3-го проходов получили t=-7,9, что больше по модулю того же табличного значения, т.е. различия также статистически значимы.

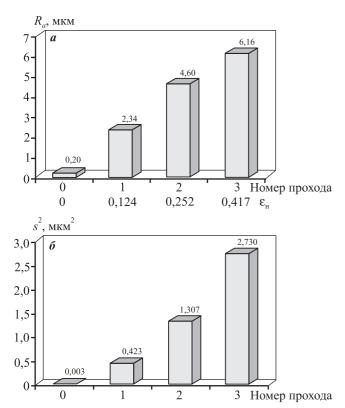
Наиболее важные данные вынесены на гистограммы рис. 4, где отображены средние значения параметра шероховатости и его дисперсия ( $s^2$ ) по про-

ходам обработки. Видно, что наибольшей чистотой обработки отличается горячепрессованная труба. Это противоречит общему правилу, в соответствии с которым полуфабрикаты после горячей обработки давлением обладают некачественной поверхностью, а для ее улучшения применяют процессы холодной обработки. Здесь наблюдается обратная ситуация. Такое явление можно объяснить тем, что при производстве медных труб используется прием вакуумирования внутренней поверхности: за счет прямого и обратного движений иглы получают переднюю и заднюю пробки, отсекающие доступ воздуха в полость трубной заготовки.

При дальнейшей холодной обработке методом безоправочного волочения инструментом воздействуют только на наружный контур трубы, внутренний контур описывается как свободная поверхность. Медь теплотехнического назначения отличается довольно крупнозернистым строением на стадии получения слитка, в процессе прессования происходит динамическая рекристаллизация, которая приводит к росту новых зерен. Их величина связана со временем прохождения процесса рекристаллизации. Полнота рекристаллизации и переход в область собирательной рекристаллизации зависят от чистоты металла и степени деформации при прессовании. Последняя величина при прессовании очень велика: при переходе от сечения слитка диаметром 250 мм в состоянии распрессовки к сечению трубной заготовки 46×3 мм коэффициент вытяжки равен 121, логарифмическая степень деформации — 4,8, а относительное обжатие — более 99 %. Поэтому становится высока вероятность неравномерного роста

Таблица 2 Статистические характеристики результатов измерений параметра шероховатости  $R_a$  внутренней поверхности медных труб

Образец	Номер образца	Среднее по половинке образца	Min	Max	Среднее по образцу	Стандартное отклонение	Дисперсия $s^2$ , мкм <sup>2</sup>	
Прессованная	0.1	0,18	0,11	0,28	0,20	0,06	0,003	
заготовка	0.2	0,23	0,22	0,23	0,20			
Поото 1 го проуста	0.1	2,40	1,03	4,01	2,34	0,65	0,423	
После 1-го прохода	0.2	2,28	1,42	3,51	2,34			
П2	0.1	4,45	2,70	7,50	4.60	1 15	1 207	
После 2-го прохода	0.2	4,75	2,50	9,30	4,60	1,15	1,307	
Поото 2 го проусно	0.1	6,40	2,20	11,60	6 16	1.65	2,730	
После 3-го прохода	0.2	5,92	3,60	9,00	6,16	1,65		



**Рис. 4.** Распределение параметра  $R_a(a)$  и его дисперсии  $s^2(6)$  по проходам волочения медной трубы с указанием накопленной степени деформации  $\varepsilon_{\rm H}$ 

зерен. Вместе с тем поверхностный слой металла в этом процессе выровнен иглой пресса.

При дальнейшей холодной деформации волочением поверхность заготовки остается свободной. Известно, что при деформации заготовки частицы металла получают поступательное малое перемещение, описываемое вектором u или его проекциями  $u_i$ . В системе координат xyz индексы равны  $i=x,\ y,\ z$ . В дальнейшем при дифференцировании перемещений по координатам получают приращения деформаций  $\varepsilon_{ij}$  ( $i=x,\ y,\ z$ ) и при их использовании строят теорию деформированного состояния. Вместе с тем часто забывается, что частицы металла одновременно испытывают жесткий разворот, который описывается тензором разворота вида [9]

$$T_{\varphi} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}).$$

Обычно тензором такого вида не пользуются, поскольку сам разворот не приводит к изменению степени нагартовки материала. Однако разворот становится важным, если рассматривается точка материала, имеющая определенные окрестности, например зерно металла.

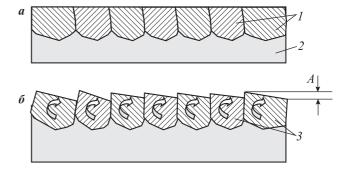
Как видно из формулы, условием разворота являются наличие ненулевых значений частных производных перемещения и наличие разницы между отдельными производными, т.е. разницы между компонентами тензора деформации. Это условие выполняется при волочении труб, что было показано в статье [10].

Как видно из табл. 2, среднее значение параметра шероховатости особенно сильно возрастает после 1-го прохода — примерно в 10 раз, затем, несмотря на примерно одинаковое частное обжатие, темп ухудшения поверхности снижается: соответственно во 2-м и 3-м проходах наблюдается увеличение параметра  $R_a$  в 2,0 и 1,3 раза. Это явление можно объяснить нагартовкой поверхностного слоя за счет пластической деформации и затруднением вследствие этого взаимного разворота зерен.

Факт существенного нарастания дисперсии от величины  $s^2 = 0,003 \text{ мкм}^2$  в прессованном состоянии до 2,730 мкм² (т.е. в 910 раз) после 3-го прохода волочения не находит пока объяснения. Реально это означает, что наряду с большим приростом количества участков с повышенной шероховатостью часть участков сохраняет пониженную шероховатость.

На рис. 5 показана принципиальная схема получения ухудшения поверхности материала при пластической деформации и при условии наличия свободной поверхности.

В начальном состоянии поверхность зерен разглажена инструментом и в целом выглядит как ровная (рис. 5, a). В результате пластической деформации (рис. 5,  $\delta$ ) возникают условия для разворота зерен, что приводит к появлению амплитудной характеристики шероховатости A.



**Рис. 5.** Условная схема расположения зерен вблизи свободной поверхности заготовки до пластической деформации (a) и после ( $\delta$ )

- 1 зерна металла вблизи поверхности; 2 глубинные слои металла;
- 3 развернутые зерна с векторами разворота (стрелки)
- А возникшая амплитуда шероховатости

Из рис. 5, в частности, видно, что для снижения величины *А* необходимо уменьшать компоненты тензора разворота, а также размер зерна материала. Так, при получении мелкозернистой структуры будет гарантирована высокая чистота поверхности продукции, поскольку амплитуда поворота не может быть больше, чем размер зерна.

Как было показано выше, шероховатость увеличивается по маршруту волочения, что является крайне нежелательным фактом. Поэтому для улучшения качества поверхности можно использовать промежуточный отжиг, что привело бы к рекристаллизации меди и получению более мелкого зерна, однако применение этой рекомендации сказывается на повышении себестоимости продукции. Поэтому лучшей альтернативой является изыскание путей уменьшения размера зерна на стадии горячего прессования. Вместе с тем, в отличие от обработки черных металлов, некоторые приемы здесь не годятся. Например, введение модифицирующих добавок влечет ухудшение теплопроводности материала, что нежелательно для труб, работающих в установках, реализующих принцип теплопередачи. Снижение температур горячей обработки приводит к большей нагрузке на гидравлические прессы, часто работающие на пределе своих возможностей. Следует рассмотреть вопрос более эффективного отвода тепла от отпрессованной заготовки, что должно подавить процессы собирательной рекристаллизации, ведущие к росту зерен и получению неровной внутренней поверхности труб.

## выводы

- **1.** В отличие от других процессов холодной обработки металлов давлением, безоправочное волочение медных труб приводит к повышению шероховатости внутренней поверхности.
- **2.** Ухудшение поверхности связано с разворотом зерен металла вблизи внутреннего контура трубы.

- **3.** При деформации волочением до логарифмической степени деформации 0,417 происходит нарастание среднего параметра шероховатости от 0,20 до 6,16 мкм, т.е. примерно в 30 раз.
- **4.** С применением приемов дисперсионного анализа выявлено, что параметр шероховатости наиболее сильно увеличивается в первом проходе волочения (в 10 раз) с уменьшением темпа прироста в последующих проходах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке федеральной целевой программы Минобразования РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 16.740.11.0505 от 16 мая 2011 г.), а также программы поддержки молодых ученых УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- Chen Xuesheng, Yi Qin, Raj Balendra // J. Mater. Process. Technol. 2004. Vol. 145. P. 247.
- 2. Sachtleber M., Raabe D., Weiland H. // J. Mater. Process. Technol. 2004. Vol. 148. P. 68.
- 3. Stoudt M.R., Levine L.E., Creuziger A., Hubbard J.B. // Mater. Sci. Eng. A. 2011. Vol. 530. P. 107.
- 4. *Кузнецов П.В., Панин В.Е., Левин К.В.* и др. // Физ. мезомеханика. 2000. Т. 3, вып. 4. С. 89.
- Кузнецов Д.Е. // Сучасні проблеми металлургіі. 2008.
   Т. 11. С. 305.
- Perry L. Young, Timothy P. Brackbill, Satish G. Kandlikar // Proc. 5-th Intern. conf. on nanochannels, microchannels and minichannels (ICNMM-2007). Puebla, Mexico, 2007. P. 1—10.
- 7. *Kazunari Yoshida, Masaki Watanabe, Hiroshi Ishikawa* // J. Mater. Process. Tecnnol. 2001. Vol. 118. P. 251.
- 8. *Розов Н.В.* Производство труб. М.: Металлургия, 1974.
- 9. *Колмогоров В.Л.* Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2001.
- 10. *Логинов Ю.Н., Шалаева М.С., Овчинников А.С.* // Пр-во проката. 2011. № 7. С. 31.