

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КАПИЛЛЯРНЫХ МЕДНЫХ ТРУБ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ*

Одной из главных проблем на пути получения качественных капиллярных медных труб является обеспечение необходимой пропускной способности, а на последнюю величину влияют два основных фактора:

1. Состояние шероховатости полости трубы.
2. Загрязнение внутренней поверхности посторонними частицами.

Действительно, при значениях внутреннего диаметра 0,35–0,9 мм частицы размерами несколько десятков микрон, попавшие тем или иным путем в канал трубы, создают большое сопротивление при передаче давления жидкостью или газом. Повышенная шероховатость препятствует удалению посторонних частиц и дополнительно создает сопротивление течению жидкости или газа.

В технологии производства капиллярных труб допускается вариант применения процесса многократного волочения без отжига, при этом к завершающей стадии волочения достигается значительное накопление пластической деформации. Ее величину можно определить приближенно, зная исходные размеры прессовой заготовки и размеры полученного продукта. При наличии прессовой заготовки наружным диаметром 46,5 мм, внутренним диаметром 40,5 мм, площадь ее поперечного сечения составит 410 мм². При получении капиллярной трубы наружным диаметром 2,10 мм, внутренним диаметром 0,80 мм, ее площадь поперечного сечения составит 2,96 мм². Суммарный коэффициент вытяжки на стадии холодной обработки составляет 138, логарифмическая степень деформации 4,9, степень деформации сдвига 8,5, относительное обжатие 99,3 %. Как видно из этих расчетов, нагартовка металла в конце технологического процесса оказывается очень большой.

Работа пластической деформации материала объемом V приближенно равна $A = T \cdot \Delta\lambda \cdot V$, где T – интенсивность касательных напряжений, $\Delta\lambda$ – приращение степени деформации сдвига в данном проходе волоче-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»

ния. В соответствии с условием текучести Мизеса $T = \sigma_s / \sqrt{3}$, где σ_s – сопротивление деформации. В первом приближении примем, что коэффициент вытяжки в единичном процессе волочения равен $\lambda = 1,5$, тогда без учета сдвиговых компонент деформации $\Delta\Lambda = \sqrt{3} \ln\lambda = 0,702$. При волочении фрикционный эффект описывают малыми значениями коэффициента трения, поэтому пренебрежем работой, затрачиваемой на трение.

В соответствии с законом сохранения энергии работа деформации A превратится в основном в тепло Q , которое выделится в деформируемом объеме V : $Q = m \cdot C \cdot \Delta t = \rho \cdot V \cdot C \cdot \Delta t$, где m – масса, $\rho = m/V$ – плотность; C – удельная теплоемкость; Δt – приращение температуры. Используем равенство $A = Q$ и определим приращение температуры: $\Delta t = \sigma_s / \sqrt{3} \cdot \Delta\Lambda / (\rho \cdot C)$. В состоянии наибольшей нагартовки сопротивление деформации меди составляет величину около 450 МПа, физические константы $\rho = 8940 \text{ кг/м}^3$; $C = 390 \text{ Дж/(кг·град)}$. После подстановки этих величин в последнюю формулу, получим $\Delta t = 46,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, средняя температура заготовки может повыситься в текущем проходе волочения на $46,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Эти результаты не учитывают характер формоизменения при волочении именно толстостенной трубы. При обжатии трубы по наружному контуру интенсивность скорости деформации сдвига равна $H = 2 \cdot v \cdot r_n / r^2$, где v – скорость перемещения наружного контура трубы в радиальном направлении; r_n и r – наружный и текущий радиусы. Из формулы, в частности, следует, что при приближении текущего или внутреннего радиуса к нулю интенсивность скорости деформации сдвига стремится к бесконечности. Поскольку степень деформации сдвига Λ связана с H соотношением

$$\Lambda = \int_t H dt, \text{ где } t = \text{время деформации, то степень нагартовки металла значитель-}$$

ительно увеличивается при уменьшении текущего радиуса, что характерно именно для класса толстостенных труб, к которому относятся капиллярные трубы. В результате на внутренней контактной с оправкой поверхности заготовки возникают большие деформации, которые могут приводить к гораздо большему тепловыделению именно на этой поверхности, чем это происходит в среднем по объему.

Для оценки этого эффекта выполнено решение задачи с помощью метода конечных элементов, реализованного в специализированном инженерном программном комплексе DEFORM, разработанного американской компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC).

Деформируемая среда: медь марки М1, свойства которой описаны соответствующей кривой упрочнения. Реализован случай волочения толстостенной трубы с размерами $\varnothing 5,16 \times 0,91 \text{ мм}$ с увеличением отношения толщины стенки трубы к наружному диаметру от 0,176 к 0,201 при коэффициенте вытяжки $\lambda = 1,54$ ($\varepsilon = \ln\lambda = 0,43$).

Для оценки распределения температуры между заготовкой, оправкой и волокой поставлена тепловая задача при следующих граничных условиях и характеристиках: температура окружающей среды – 20 °С; коэффициент теплопередачи – 1 кВт/(м²·град); коэффициент теплопроводности меди 382 Вт/(м·град), твердого сплава ВК8 (материал волоки) – 44 Вт/(м·град), стали (материал оправки) – 50,2 Вт/(м·град); удельная теплоемкость меди 385 Дж/(кг·град), твердого сплава ВК8 – 462 Дж/(кг·град), стали – 134 Дж/(кг·град); степень черноты не задана, т.к. тепловое излучение незначительно.

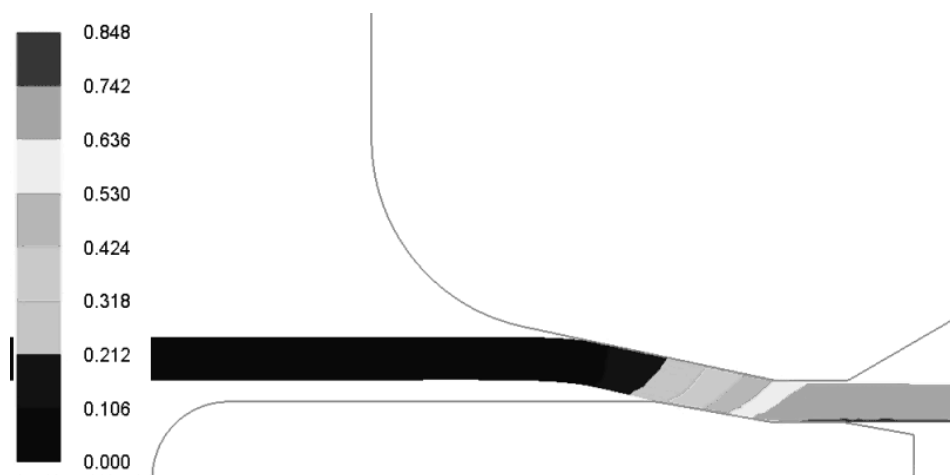


Рис. 1. Распределение частной степени деформации при волочении толсто-стенной трубы на самоустанавливающейся оправке (верхняя часть очага деформации)

Полученное решение нельзя распространить на весь цикл волочения трубной заготовки, поскольку остается неизвестным баланс тепла, уносимого заготовкой и аккумулируемого инструментом. Однако решение позволяет оценить, в каких областях инструмента температура повышается более интенсивно. В частности выявлено, что волока нагревается до меньших температур, чем плавающая оправка. Это объясняется меньшей поверхностью контакта заготовки с оправкой, чем с волокой, и большей локализацией деформации на внутреннем контуре заготовки.

На рис. 2а стрелками показано направление теплоотвода от нагреваемой от энергии деформации заготовки. Видно, что поверхность теплоотвода в сторону волоки оказывается больше, чем в сторону оправки. Важно отметить, что разница в характере теплопередачи в сторону волоки и в сторону оправки оказывается разной. Наружный контур волоки граничит с обоймой и волокодержателем, что позволяет отводить тепло. Оправка не имеет контура отвода тепла, поэтому поступившее тепло аккумулируется в течение цикла волочения. Процесс длительного накопления тепла мог бы закончиться расплавлением оправки, но при достижении опреде-

ленной температуры устанавливается такой баланс теплопередачи, при котором часть тепла уносится заготовкой.

На рис. 2а показано распределение температур, достигнутое после протягивания 40,5 мм заготовки при скорости 100 мм/с. Расчетами выявлено, что наиболее нагретой частью плавающей оправки является зона схода с ее поверхности заготовки, таким образом, именно здесь можно ожидать перегрева заготовки. Для доказательства этого на рис. 2б приведено фото оправки с характерной зоной износа и омеднения. Из сравнения двух рисунков следует, что зоны наибольшего нагрева и износа совпадают.

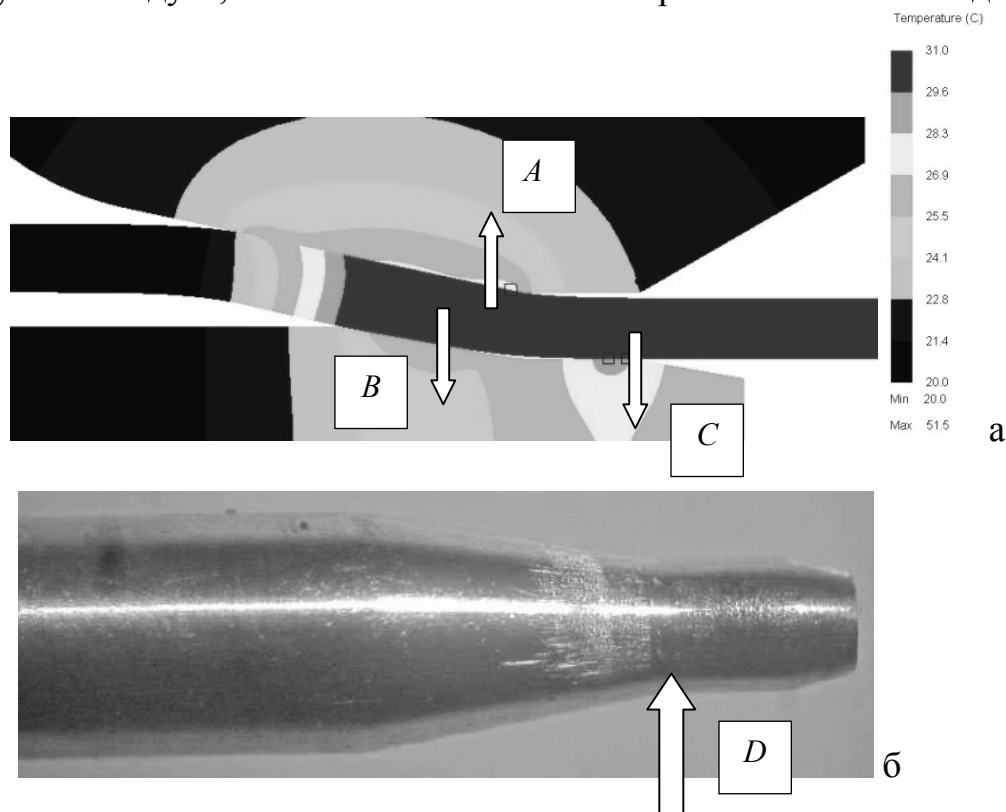


Рис. 2. Распределение температуры в заготовке и инструменте при волочении капиллярной трубы на самоустанавливающейся оправке (а) с направлениями теплоотвода: *A* – в сторону волокна; *B* и *C* – в сторону оправки; зона *D* (обозначена белой стрелкой) износа и омеднения стальной оправки (б)

Таким образом, одной из причин, приводящих к разрушению структуры внутренней поверхности капиллярных медных труб при волочении, может являться феномен поверхностно-деформационного износа. Выявлено, что внутренняя поверхность медной капиллярной трубы попадает под действие повышенного тепловыделения, вследствие чего создаются условия рекристаллизации тонкого поверхностного слоя меди с его последующим разрушением. Предложено управлять состоянием внутренней поверхности капиллярных труб установлением контроля над тепловыми потоками.