

КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТЕРЖНЕВЫХ И ТРУБЧАТЫХ ГИБКИХ ВОЛНОВОДОВ

Б.М. ХРУСТАЛЕВ, Ю.Г. АЛЕКСЕЕВ, А.Ю. КОРОЛЁВ
*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В докладе приводится описание и основные технологические параметры процессов изготовления сложнопрофильных ступенчатых стержневых и трубчатых концентраторов-волноводов для ультразвукового воздействия на кровеносные сосуды. Технологические процессы основаны на применении комбинации из различных методов как механической, так и физико-химической обработки, таких как: волочение, раздача и обжим, электрохимическая прошивка, химическая очистка и электролитно-плазменная обработка.

Системы акустические для эндоваскулярной абляции включают в себя ступенчатые концентраторы-волноводы стержневого (СВ) либо трубчатого (ТВ) типа. Они являются сложнопрофильными длиномерными малого диаметра с высокой точностью размеров и качеством рабочих поверхностей изделиями: длина – 700 мм; ступенчатая наружная поверхность с диаметрами: 1,5–1,3–1,0 мм, квалитет точности h7; сферический наконечник с наружным диаметром 1,35 мм, квалитет точности k7; шероховатость наружных поверхностей Ra 0,1 мкм. У ТВ: диаметр внутренней полости от 0,5 до 1,0 мм с шероховатостью Ra 0,32 мкм; в наконечнике осевое отверстие диаметром $0,5^{+0,2}$ мм и три боковых микроотверстия диаметром $0,3 \pm 0,05$ мм. Материал: сталь 12X18H9 с σ_B свыше 600 МПа для ТВ и сталь 12X18H10T с σ_B свыше 1400 МПа для СВ.

Аустенитные стали плохо поддаются механической обработке резанием (склонность к налипанию, высокие температуры и большие нагрузки в зоне обработки). В связи с этим и, исходя из анализа конструкций изделий, разработаны технологии изготовления СВ и ТВ включающие комплекс различных методов механической (пластическая деформация) и физико-химической обработки.

Исходной заготовкой для изготовления СВ выбрана проволока 4,0–П–Т–12X18H10T ГОСТ 18143-72 ($\sigma_B = 540$ МПа).

Для достижения заданных механических характеристик проволока подвергалась многократному волочению без промежуточной разупрочняющей термообработки до конечного диаметра ~2 мм (суммарная степень обжатия ~80%). С целью уменьшения числа проходов, снижения напряжения волочения и коэффициента контактного трения и улучшения физико-механических характеристик материала между проходами выполнялась электролитно-

плазменная обработка (ЭПО) заготовки. Волочение с промежуточной ЭПО продолжительностью от 1 до 5 мин, позволило добиться упрочнения материала в 2,5 раза при меньшей суммарной степени обжатия [1].

Процесс формообразования цилиндрических ступеней и рабочего наконечника СВ и плавных переходов сложного профиля между ними осуществлялся размерной ЭПО, которая обеспечила: сохранение структуры и свойств материала после упрочнения; равномерность механических характеристик по длине; требуемую точность размеров; высокое качество поверхности ($Ra\ 0,1\ \mu\text{м}$) [2].

Исходной заготовкой для изготовления ТВ выбрана труба $1,5_{\text{в}} \times 0,25_{\text{в}} \times 1000_{\text{кр}} - 12\text{X18H9T}$ ГОСТ 9941-81 ($\sigma_{\text{в}} = 549\ \text{МПа}$).

Для формирования ступеней ТВ реализовали схему безоправочного волочения с проведением разупрочняющей термообработки (при температуре $1150\ ^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением в воде) между проходами. По расчетам и на практике выполнено 5 проходов со степенью обжатия $0,09-1,20$. При волочении достигнуто повышение прочностных характеристик материала в 1,5 раза ($\sigma_{\text{в}} = 810\ \text{МПа}$).

Формообразование сферического рабочего наконечника ТВ с осевым отверстием осуществляли методами раздачи (четыре перехода при коэффициенте раздачи $1,11-1,12$) и обжима в один переход. После каждого перехода раздачи для разупрочнения исходных участков заготовки проводилась разупрочняющая термообработка [3].

Формирование боковых микроотверстий правильной формы и требуемой точностью размера в рабочем наконечнике ТВ выполняли электрохимической прошивкой в электролите 25 % раствора натрия азотнокислого тонким медным электродом с лаковой изоляцией (диаметр электрода – $0,07\ \text{мм}$, скорость подачи электрода – $20\ \mu\text{м/с}$, напряжение – $15\ \text{В}$, расход электролита – $60\ \text{мл/мин}$). Процесс отличался высокой стабильностью при интенсивном и полном удалении продуктов анодного растворения из зоны обработки [4].

Очистка от окалины внутренней поверхности ТВ проводилась на проток в смеси фтористой, азотной и хлористой кислот. Температурно-скоростные ($25\ ^\circ\text{C}$, $0,4\ \text{мл/мин}$) и временные параметры процесса ($10\ \text{мин}$) позволили качественно очистить поверхность от окалины с обеспечением шероховатости $Ra\ 0,32\ \mu\text{м}$ и повышением потенциала питтингообразования при испытаниях в физиологическом растворе с $+38\ \text{мВ}$ (для шлифованной поверхности с состоянием поставки) до $+402\ \text{мВ}$ (после термообработки и химической очистки продолжительностью $10\ \text{мин}$).

С целью одновременного обеспечения полного удаления окалины, придания наружной поверхности ТВ однородного блеска, повышения потенциала питтингообразования до $+392\ \text{мВ}$ со снижением в три раза плотности тока коррозии (с $0,65 \cdot 10^{-8}\ \text{А/см}^2$ до $0,22 \cdot 10^{-8}\ \text{А/см}^2$), достижения требуемой точности размеров и снижения шероховатости до $Ra\ 0,1\ \mu\text{м}$ оптимизирована электролитно-плазменная обработка в солевом электролите (4% рас-

твор сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, температура $90\text{ }^\circ\text{C}$). Данные показатели достигнуты без существенного съема металла ($0,01\text{ мм}$ на сторону) при времени обработки ($t_{\text{опт}} 240\text{ с}$).

Таким образом разработаны и реализованы на практике технологические процессы изготовления стержневых и трубчатых волноводов для ультразвукового воздействия на стенки кровеносных сосудов, обеспечивающие формирование требуемой геометрии и точности размеров и высокие прочностные характеристики изделий, их надежную эксплуатацию, основанные на применении комплекса из механических и физико-химических методов обработки [5; 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением на прочностные характеристики стали 12X18H9 / Ю.Г. Алексеев, Л.А. Исаевич, А.Ю. Королев, В.С. Нисс // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – №. 11. – С. 85–90.

2. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, А.Э Паршуто, В.С. Нисс // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2012. – №3. – С. 3-6.

3. Пластическое формообразование наконечника концентратора-волновода для ультразвуковой эндоваскулярной абляции / Дай Вэньци, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, А.С. Будницкий // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2021. – Т. 20. – №2. – С. 101-108.

4. Электрохимическая прошивка микроотверстий в трубчатом ступенчатом концентраторе-волноводе медицинского назначения / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, А.С. Будницкий, Дай Вэньци // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2019. – Т. 18. – №5. – С. 12–14.

5. Пластическое деформирование и электрофизикохимическая обработка трубчатых медицинских концентраторов-волноводов / Дай Вэньци, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, А.С. Будницкий // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2020. – Т. 19. – №6. – С. 499–506.

6. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю.Г Алексеев, А.Ю. Королев, В.Т. Минченя, В.С. Нисс, А.Э. Паршуто, Б.М. Хрусталева / под общ. редак. академика Б.М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2015. – 203 с.