

УДК 616.77, 621.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ СТЕНТ-ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НИТИНОЛА
Савченко А.Л., Минченя В.Т., Сатторов С., Непогода А.У.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Тема исследования связана с совершенствованием технологии изготовления изделий медицинского назначения. Задачей исследования является анализ влияния условий термообработки нитиноловой проволоки на ее механические характеристики. Предложены перспективные методы повышения качества термообработки стент-элементов из нитинола.

Ключевые слова: нитинол, проволока, термообработка, натяжение, изгибная жесткость.

STUDY OF THE HEAT TREATMENT PROCESS OF NITINOL STENT ELEMENTS

Savchenko A.L., Minchenya V.T., Sattorov S., Nepogoda A.Y.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The topic of the research is related to improving the technology for manufacturing medical products. The objective of the study is to analyze the influence of heat treatment conditions of nitinol wire on its mechanical characteristics. Promising methods have been proposed to improve the quality of heat treatment of nitinol stent elements.

Key words: nitinol, wire, heat treatment, tension, flexural rigidity.

*Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by*

Объектом исследования является технологический процесс термообработки изделий из нитиноловой проволоки.

В Научно-технологическом парке БНТУ «Политехник» налажен серийный выпуск стентграфтов [1], в конструкции которых имеются зигзагообразные элементы из нитинола (рисунок 1).



Рисунок 1

Для формообразования таких элементов требуется термообработка с фиксацией требуемой формы. Режим термической обработки определяет температуру, при которой нитинол находится в состоянии сверхупругости, то есть воссоздает форму, запомненную при термообработке. Для термообработки такие элементы размещают на многоместных приспособлениях в виде труб со штифтами для придания проволоке зигзагообразной формы. Для повышения производительности проволока навивается в несколько рядов (например, в 2 ряда), каждый ряд в несколько слоев (количество слоев доходит до де-

сяти). Внешний вид такого приспособления показан на рисунке 2, расположение проволоки на штифтах – на рисунке 3.

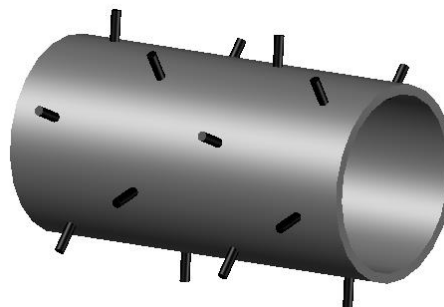


Рисунок 2



Рисунок 3

Проволока навивается с натяжением и помещается в печь непосредственно на приспособлении.

В результате послеоперационного контроля выяснилось, что термообработанные заготовки стент-элементов, даже взятые с одного приспособления, имеют различную изгибную жесткость. В ряде случаев получается, что жесткость недостаточна для использования в стент-графтах.

Ранее, в процессе разработки технологических процессов, исследовались такие параметры, влияющие на механические свойства образцов, как температура термообработки, геометрия готовых изделий и ее изменение в процессе термообработки, режимы охлаждения и другие [2]. Однако в реальных производственных условиях проявился такой нежелательный эффект, который может быть вызван следующими причинами:

- неравномерный нагрев и охлаждение проволоки при термообработке из-за многослойной навивки;
- неравномерное натяжение проволоки при навивке по той же причине;
- изменение размеров и, соответственно, снижение жесткости из-за перехода на новый слой навивки;
- изменение натяжения из-за разности коэффициентов теплового линейного расширения нитинола и стали приспособления.

К сожалению, в производственных условиях сложно обеспечить сортировку термообработанных заготовок по слоям навивки на приспособление, однако, можно сформулировать следующие соображения.

Влияние натяжения проволоки на жесткость термообработанных образцов была рассмотрена ранее [3]. Вместе с тем, полученные результаты требуют уточнения: является ли повышение изгибной жесткости проволоки при снижении натяжения результатом характера термообработки или увеличением радиуса изгиба из-за снижения усилий. По результатам расчетов определяющим фактором является все же влияние условий термообработки.

Проверка неравномерности нагрева и охлаждения проволоки в слоях навивки требует сложных исследований, однако условия термообработки позволяют надеяться на незначительное проявление этого фактора.

Коэффициент теплового линейного расширения нитинола равен от $6,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в мартенситной фазе до $11 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в аустенитной фазе. Для нержавеющей стали 40X13 тот же показатель заведомо больше – $12,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. То есть при нагреве натяжение проволоки будет увеличиваться из-за температурных деформаций. Это следует учитывать при выборе предварительного натяжения.

При переходе на новый слой навивки диаметр полученной заготовки увеличится на удвоенный диаметр проволоки. Для исследования были взяты образцы проволоки диаметром 0,45 мм, то есть диаметр от слоя к слою будет увеличиваться на 0,9 мм.

При переходе к новому слою каждый раз длина наклонного участка зигзага будет увеличиваться примерно на 1,3 %, соответственно на столько же будет уменьшаться изгибная жесткость этого участка. К десятому слою удлинение составит 12 %.

Даже если соединять концы заготовки стент-элемента до получения одного и того же диаметра, геометрия зигзага все равно будет отличаться, что приведет к отличию в жесткости готового стент-элемента. Более того, при использовании заготовки от слоя к слою будет увеличиваться неравномерность жесткости готового стент-элемента в различных направлениях. Поэтому требуется изучить, как геометрия зигзага влияет на радиальную жесткость готового стент-элемента и на равномерность жесткости по окружности.

Таким образом, можно выделить следующие направления исследований процесса термообработки заготовок стент-элементов:

- исследование влияния натяжения проволоки в приспособлении на радиус изгиба и влияние радиуса на жесткость стент-элемента;
- исследование влияния геометрии зигзага стент-элемента на радиальную жесткость готового изделия и ее равномерность по окружности;
- исследование равномерности нагрева и охлаждения проволоки в многоместном приспособлении для термообработки.

Работа выполнена в интересах и при поддержке Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».

Литература

1. Разработать оригинальную конструкцию системы аортального стентграфта и внедрить технологию применения системы аортального стентграфта для хирургического лечения аневризм грудной аорты при операциях с искусственным кровообращением [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключительный) : ГБ 03.08-1/2011 / кол. авт. Белорусский национальный технический университет, рук. Минченко В.Т., исполн. Минченко Н.Т., исполн. Савченко А.Л., исполн. Степаненко Д.А. – Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2013. – Н ГР 20113925.
2. НИР «Разработка и исследование конструктивных и технологических параметров формообразования изделий медицинского назначения из никелида титана» в рамках задания 4.1.08 «Разработка и исследование технологии задания формы материалам на основе никелида титана для получения изделий медицинского назначения» [Электронный ресурс]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. В.Т. Минченко; исполн.: А.Л. Савченко [и др.]. – Минск, 2015. – 120 с. – № ГР 20141055.
3. Богдан, П. С. Влияние натяжения при термообработке на жесткость образцов из нитинола / П.С. Богдан, А.Л. Савченко, В.Т. Минченко // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16–18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 203–204.