

Теперь, продифференцируем (7), выполним интегрирование по частям и воспользуемся (1) и (3), чтобы получить $E'(t) = 0$. Значит $E(t) = \text{const}$. Пользуясь начальными условиями (6), вычисляем $E(0) = 0$. А значит, $E \equiv 0$. Отсюда следует, что $\hat{\partial}_x u = \hat{\partial}_x u = 0$ в \bar{Q} , т. е. $u \equiv \text{const}$ в \bar{Q} . Так как $u \in C(\bar{Q})$, то из $u \equiv \text{const}$ (7) следует, что $u \equiv 0$ в \bar{Q} . Из последнего результата и равенства $u = u_1 - u_2$ следует $u_1 = u_2$ в \bar{Q} .

Литература

1. Расулов, М. Л. Метод контурного интеграла и его применение к исследованию задач для дифференциальных уравнений / М. Л. Расулов. – М.: Наука, 1964. – 464 с.
2. Владимиров, В. С. Обобщенные функции в математической физике / В. С. Владимиров. – М.: Наука, 1979. – 320 с.

УДК 621.791.725

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НИТИНОЛА В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ Савченко А.Л.¹, Минченя В.Т.¹, Роговцова А.С.¹, Сатторов С.¹, Августинович А.Л.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены характеристики фазовых переходов в проволоке из никелида титана при различных режимах лазерной сварки. Показано, как нагрев в зоне сварки влияет на характеристики материала и свойства памяти формы. Предложены рекомендации по практическому использованию результатов исследования.

Ключевые слова: нитинол, лазерная сварка, механические характеристики, фазовые переходы.

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF NITINOL IN THE ZONE OF LASER WELDING

Savchenko A.¹, Minchenya V.¹, Rogovtsova A.¹, Sattorov S.¹, Avgustinovich A.²

¹Belarusian National Technical University

²Science and Technology Park of BNTU "Polytechnic"

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The characteristics of phase transitions in a titanium nickelide wire under various laser welding modes are considered. It is shown how heating in the weld zone affects material characteristics and shape memory properties. Recommendations for the practical use of the research results are proposed.

Key words: nitinol, laser welding, mechanical characteristics, phase transitions.

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

При изготовлении различных изделий из нитиноловой проволоки, например, элементов эндопротезов сосудов, требуется соединение концов проволоки для получения замкнутых структур. Одним из наиболее производительных методов является сварка. При изготовлении изделий медицинского назначения в условиях Научно-технологического парка БНТУ «Политехник» используется лазерная сварка, выполняемая после термообработки элементов на сварочном автомате Rofin Select производства ROFIN-BAASEL Lasertech GmbH & Co, Германия. Сварка выполняется внахлест.

При испытаниях и эксплуатации сварных соединений возникают две основные проблемы: разрушение проволоки при статическом или циклическом нагружении в непосредственной близости от сварного шва и изменение характера фазовых переходов в нитиноле в сварном шве и непосредственно возле него вследствие нагрева при сварке, хотя по данным [1] сверхупругость и

эффект памяти формы обычно сохраняются в материале после сварки. На рисунке 1 показан стент-элемент, подвергавшийся циклическому нагружению. Усталостное разрушение произошло непосредственно возле сварного шва.

Для оценки влияния режимов сварки на характеристики шва использовалась нитиноловая проволока диаметром 0,43 мм без термообработки, используемая для изготовления каркасов стент-графтов. Были изготовлены образцы, сваренные внахлест точечной лазерной сваркой с различным количеством точек сварки и, следовательно, с разной степенью нагрева в процессе соединения. Образцы имели вид двух сваренных прямолинейных фрагментов проволоки. На рис. 2 показаны примеры сварных швов.

Полученные образцы подвергались статическому нагружению на разрывной машине MTS Systems до разрушения и на специальном приспособлении для циклического нагружения. Кроме того, образцы материала сварного шва и участков

проволоки на различных расстояниях от шва подвергались анализу фазовых переходов на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) Mettler Toledo.

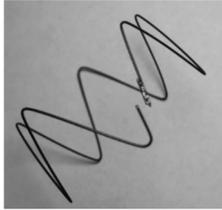


Рисунок 1 – Разрушение сварного стент-элемента

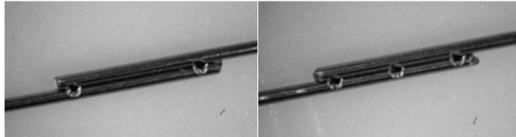


Рисунок 2 – Сварные швы

В ходе эксперимента выяснилось следующее. Разрушение образцов как при статическом, так и при циклическом нагружении происходит в непосредственной близости от сварного шва, сам шов не разрушается даже при минимальном количестве точек сварки (рис. 3). При этом прочность сваренного образца на разрыв ниже, чем у сплошного материала примерно на 30% при использовании сплошного шва и снижается при уменьшении числа точек сварки.

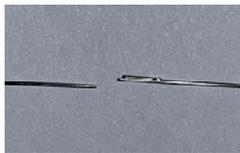


Рисунок 3 – Образец после испытания статическим нагружением

Непосредственно шов имеет прочность основного материала. На рис. 4 видно, что в поперечном разрезе два фрагмента проволоки фактически представляют собой одно целое, то есть выделить зону шва визуально невозможно. Это объясняется тем, что при сварке не используется дополнительный материал, а соединение получается за счет расплавления основного материала.

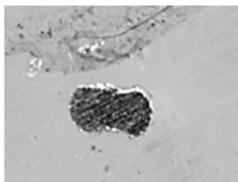
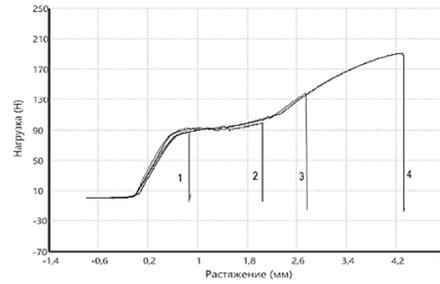


Рисунок 4 – Поперечный разрез сварного шва

На рис. 5 показаны графики нагружения образцов до разрушения, полученные на разрывной машине.

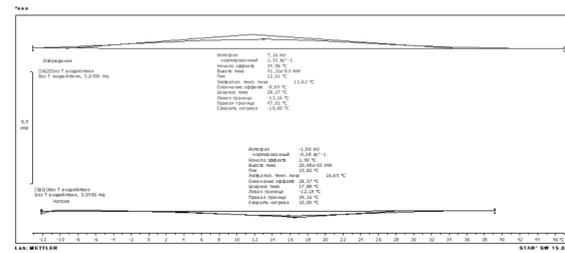


1 – две точки сварки; 2 – три точки; 3 – сплошной шов; 4 – сплошная проволока

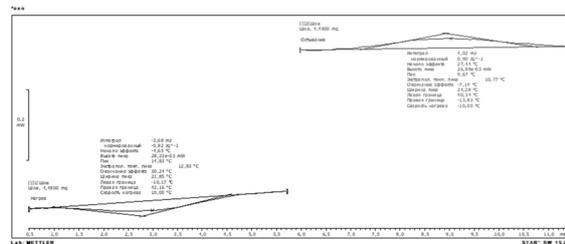
Рисунок 5 – Графики нагружения образцов

Видно, что прочность увеличивается по мере увеличения точек сварки, но не достигает прочности сплошной проволоки. Это можно объяснить концентрацией напряжений в зоне, непосредственно примыкающей к шву.

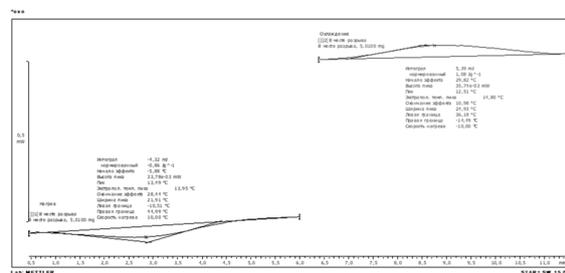
На рис. 6 приведены кривые, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии.



а



б



в

а – исходный материал; б – материал сварного шва;

в – материал в месте разрыва

Рисунок 6 – Графики ДСК

Из анализа кривых ДСК видно, что нагрев при сварке приводит к изменению характеристик фазовых переходов, тем больше, чем ближе участок проволоки к сварному шву. Это может привести к неравномерной жесткости изделия при рабочей температуре и, следовательно, к неравномерной деформации.

Следует сделать вывод, что при разработке новых технологических процессов требуются методы соединения, минимизирующие температурное воздействие на материал. В настоящий момент

ведутся исследования комбинированных методов соединения, использующих одновременно как сварку, так и пластическое деформирование.

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

Литература

1. Ming H. Wu / Fabrication of Nitinol Materials and Components In: Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies / Ming H. Wu. – Kunming, China, 2001. – P. 285–292.

УДК 617.3

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПЛАСТИН ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

Савченко А.Л., Муминбоев А.Д.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Тема исследования связана с совершенствованием изделий медицинского назначения. Задачей исследования является анализ различных форм поперечного сечения пластин и выбор оптимальной формы с точки зрения обеспечения максимальной прочности и жесткости при минимальной высоте профиля. Показано, что наилучшими параметрами с точки зрения максимальных прочности и жесткости при минимальной высоте профиля обладает трубчатое сегментное сечение, однако оно является недостаточно технологичным, так как для некоторых материалов получение сортамента в виде трубок является затруднительным. Поэтому следует обратить внимание на фрезерованные профили, такие как П-образный и уголковый.

Ключевые слова: остеосинтез, пластины, титан, изгибная жесткость, форма поперечного сечения

OPTIMIZATION OF THE FORM OF PLATES FOR OSTEOSYNTHESIS

Savchenko A., Muminboev A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The research topic is related to the improvement of medical devices. The task of the study is to analyze various forms of the cross-section of the plates and select the optimal form in terms of ensuring maximum strength and rigidity at a minimum profile height. It is shown that the tubular segmental section has the best parameters in terms of maximum strength and rigidity at the minimum profile height, but it is not technologically advanced enough, since for some materials it is difficult to obtain an assortment in the form of tubes. Therefore, it is important to pay attention to milled profiles, such as U-shaped and corner ones.

Key words: osteosynthesis, plates, titanium, flexural rigidity, cross-sectional shape.

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

Под остеосинтезом подразумевается хирургическое сопоставление и соединение отломков до полного их сращения. Для внутреннего остеосинтеза применяют следующие имплантаты: штифты, пластины, винты, спицы, проволоку, имплантаты с памятью формы. В работе исследуются титановые имплантаты в виде пластин.

Задачей исследования является анализ различных форм поперечного сечения пластин и выбор оптимальной формы с точки зрения обеспечения максимальной прочности и жесткости при минимальной высоте профиля.

При использовании по назначению пластина работает преимущественно на изгиб, поэтому ее можно представить в виде консольно нагруженной балки с заземленной опорой. Тогда прочность пластины без учета концентрации напряжений в местах крепежных отверстий определяется

рабочими напряжениями в материале. Максимальные напряжения в месте заделки и величина прогиба, определяющая жесткость пластины

$$\sigma_{W_{xmax}}^{M_n}; f_{max} = \frac{PL^3}{3EJ_x},$$

где M_n – изгибающий момент; W_x – момент сопротивления поперечного сечения при изгибе; P – изгибающая нагрузка; L – длина деформируемого пролета; E – модуль упругости материала пластины; J_x – момент инерции поперечного сечения.

Из приведенных формул видно, что прочность пластины при изгибе определяется величиной момента сопротивления поперечного сечения при изгибе W_x , жесткость – величиной момента инерции поперечного сечения J_x .

Рассмотрим варианты профилей поперечного сечения, среди которых проанализируем свойства