

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НИКЕЛИД ТИТАНА-ПОЛИМЕР

Борисов А.А., Чернышова А.А., Виноградов Р.Е., Лукина Е.А.

Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

wypukborisov@gmail.com

Наиболее широко используемым материалом, проявляющим сверхупругость, являются сплавы на основе никелида титана (далее – НТ) [1,2]. Они способны обратимо изменять свою форму (до 10%) в наиболее часто используемом в технике интервале рабочих температур от -50° до 100°С. Кроме того, у НТ хороший комплекс механических свойств и высокая коррозионная стойкость. Однако его плохая обрабатываемость резанием, свариваемость, а так же высокая стоимость ограничивают его применение. Одним из способов устранения указанных недостатков является разработка композиционных материалов (КМ), в которых будет совмещена относительно недорогая матрица, позволяющая изготавливать сложные детали, и армирующие элементы из сплавов на основе НТ, обеспечивающие сверхупругость.

Для создания сверхупругих КМ в качестве матрицы целесообразно использовать эластомеры группы реактопластов, к которым относятся каучуки, резины и полиуретаны [5]. При выборе конкретного полимера необходимо учитывать его упругую деформацию, которая должна составлять не менее 12%, и модуль упругости, который должен оптимально отвечать механическому поведению волокон КМ. По этим показателям подходит силиконовая резина (далее – СР).

Поэтому в данной работе было исследованы свойства КМ, у которых в качестве матрицы была использована силиконовая резина, а в качестве армирующего элемента использовали проволоку из сплава ТН1 с содержанием никеля 55,7% по массе. Структура сплава после теплого волочения имела большую концентрацию дефектов кристаллического строения, которая способствовала формированию сверхупругого поведения материала в широком диапазоне температур [3,4]. Полученный композиционный материал в работе условно обозначен как КМ НТ-СР.

Образцы КМ НТ-СР изготавливали в виде пластин размером 10×80 мм и толщиной 3 мм. Волокна из НТ располагали вдоль длинной стороны образцов в один ряд, на одинаковом расстоянии друг относительно друга для обеспечения равномерного распределения полимера между волокнами. Объемную долю волокон в образцах КМ изменяли от 5 до 15%.

Первоначально исследовали способность компонентов КМ проявлять упругие и сверхупругие свойства. Для этого определяли критическую степень деформации образца, после которой в нем возникает остаточная деформация. Образцы деформировали изгибом на различную степень деформации вокруг круглой оправки различного диаметра и после снятия нагрузки измеряли остаточную деформацию.

Проволока из сплава ТН1, находящаяся в сверхупругом (холоднодеформированном) состоянии при нормальной температуре, и СР показали схожее поведение при накоплении остаточной деформации (рис. 1). Остаточная деформация появляется в СР после деформирования на 8 %, а в проволоке из ТН1 – при 10 %. Испытания образцов КМ с объемным содержанием волокон 4, 8 и 12% показали, что различная степень наполнения волокном практически не влияет на появление и накопление остаточной деформации (рис. 1). Независимо от объемной доли волокон остаточная деформация возникает при наведенной деформации $\varepsilon = 13\%$ и далее возрастает, достигая величины $0,9 \div 1,1\%$ при $\varepsilon = 20\%$. Быстрее всего остаточная деформация возрастает в КМ с 12 об.%.

Механическое поведение матрицы, волокон и образцов КМ НТ – СР с различной объемной долей волокон изучали методом трехточечного изгиба при изменении величины прогиба f от 3 до 7 мм (на базе 25 мм).

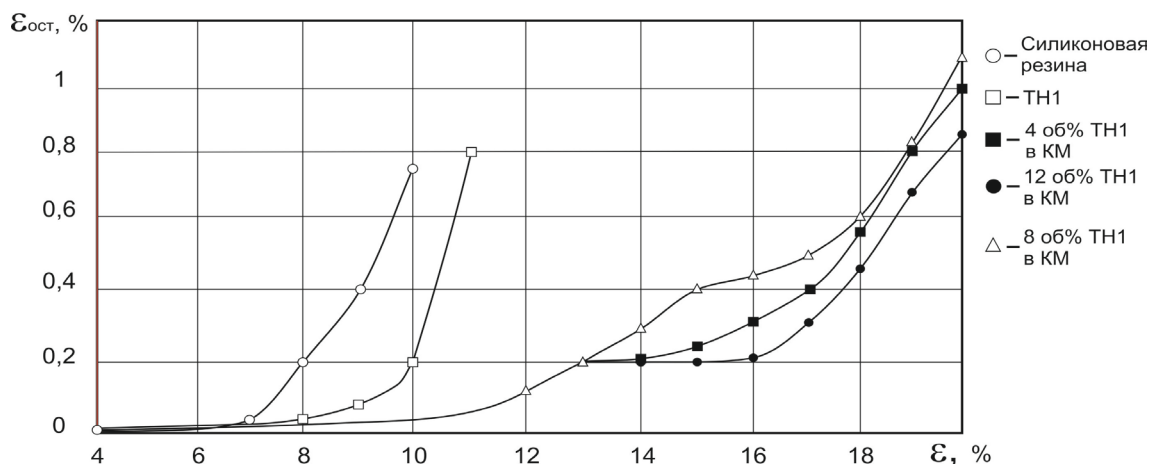


Рисунок 1 - Влияние степени наведенной деформации на появление и развитие остаточной деформации для сплава ТН1, силиконовой резины и КМ НТ-СР с различной объемной долей

При деформировании СР нагрузка почти линейно возрастает вплоть до начала разгрузки (рис. 2, а). На первой стадии разгрузки усилия резко падают, а затем наблюдается более плавное их уменьшение. Кривые разгрузки не возвращаются в исходное положение. Это, по-видимому, связано с упруго-вязким поведением силикона и высокой деформацией полимерного материала, в результате чего напряжения не успевают релаксировать, что приводит к появлению остаточной деформации. При максимальном прогибе на 7 мм деформирующие усилия составляют всего 1,2 Н, а жесткость равна $\approx 0,17$ Н/мм.

Волокна из сплава ТН1 имеют несколько другое механическое поведение. При нагружении проволоочных образцов (рис. 2, б) нагрузка растет линейно лишь на небольшом участке (до $f = 0,5$ мм), а затем кривая деформации приобретает вид классического сверхупругого поведения. Это свойство образцов из НТ можно объяснить сменой механизма деформации, при малых степенях наведенной деформации реализуется упругая деформация, а при больших – сверхупругое поведение, обусловленное мартенситным превращением под напряжением и (или) переориентацией мартенситных кристаллов по двойниковому механизму. После снижения напряжений происходит возврат наведенной деформации. При прогибе на 7 мм нагрузка, действующая на образец, составляет 9,2 Н ($K=1,3$ Н/мм), т.е. жесткость одного волокна в 7,7 раз больше по отношению к жесткости матрицы.

Испытания образцов КМ с различной степенью наполнения (рис. 3) показали повышение жесткости материала с увеличением объемной доли волокон. При деформировании образца КМ содержащего 4 об. % волокон, на 7 мм была зафиксирована нагрузка 22,6 Н ($K=3,2$ Н/мм), для КМ с 8 об. % волокон – 42,1 Н ($K=6,0$ Н/мм), а для КМ с 12 об. % – 63 Н ($K=9,0$ Н/мм). То есть при увеличении объемной доли волокон в 3 раза жесткость КМ НТ-СР также трехкратно возрастает. При визуальном осмотре в образцов КМ после испытаний на трехточечный изгиб трещин и несплошностей, вызванных отслоением армирующего волокна от матрицы не наблюдалось, из чего следует, что адгезионная связь не была нарушена и образцы полностью сохранили свои функциональные свойства.

Результаты проведенных испытаний позволяют сделать вывод о работоспособности КМ НТ-СР как функционального материала, обладающего сверхупругостью.

Необходимо отметить, что армирование СР волокнами НТ приводит к повышению предельной деформации, до которой можно нагружать КМ без образования остаточной деформации. В сочетании с увеличением жесткости КМ это позволит расширить область работоспособности КМ как сверхупругого материала и применять его для изготовления нагруженных элементов медицинских изделий (эндопротезы и экзопротезы).

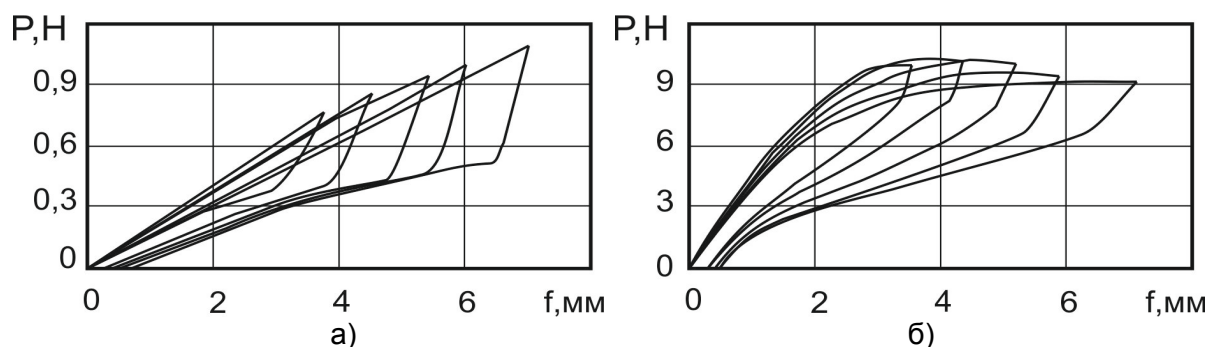


Рисунок 2 – Статические испытания СР (а) и проволоки из сплава ТН1 (б) методом трехточечного изгиба

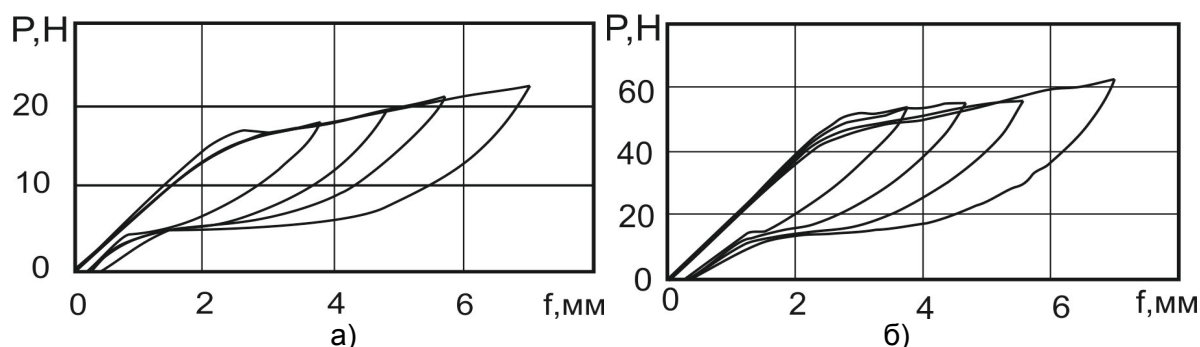


Рисунок 3 - Статические испытания КМ НТ-СР с объемной долей волокон 4 % (а) и 12 % (б) методом трехточечного изгиба

Список литературы

1. Ооцука, К. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки, Ю. Сэкигути, Ц. Табаки, Т. Хомма, С. Миядзаки; Под ред. Х.Фунакубо. – Москва: Металлургия, 1990. –224.
2. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys // Progress in Materials Science. 2005. No.5 (50). P. 511-678.
3. Формирование структуры сплава ТН1 при деформации и термической обработке// М.Ю. Коллеров [и др.] // Титан.-2010.-№3.-С.4-10.
4. Влияние состава и структуры на характеристики упругости и сверхупругости сплавов на основе титана / М.Ю. Коллеров [и др.] // Титан. – 2010. –№ 4. – С. 11-15.
5. Кербер, М. Л. 1149 Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие.-4-е испр. и доп. изд./под ред. А.А. Берлина.-СПб.: ЦОП «Профессия», 2014.-592 с.
6. Бобович, Б. Б. Неметаллические конструкционные материалы: учеб. пособие / Б. Б. Бобович.– МГИУ, 2009.- 384 с.