

УДК 677.025.6:537.311.4  
DOI 10.17223/19988621/49/10

В.И. Халиманович, Л.А. Кудрявин, О.Ф. Беляев, В.А. Заваруев

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И МЕТОДА ПОДОБИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОТРИКОТАЖНЫХ СЕТЕПОЛОТЕН

С использованием нелинейной теории упругости и метода подобия получена формула, связывающая удельную нагрузку в исходном образце с удельной нагрузкой в образце с такой же, но уменьшенной структурой и такой же относительной деформацией, изготовленным из микропроволоки с другим диаметром и из другого материала.

**Ключевые слова:** *металлический трикотаж, отражающая поверхность, коэффициент отражения электромагнитных волн, метод подобия, нелинейная теория упругости.*

Металлотрикотажные сетеполотна (металлотрикотаж – трикотаж из микропроволок) в настоящее время широко используются в качестве отражающей поверхности (ОП) трансформируемых космических антенн [1]. Для создания высокого коэффициента отражения электромагнитных волн размер ячеек в сетеполотне должен быть в 15–20 раз меньше длины волны. С увеличением частоты электромагнитной волны уменьшается длина волны и соответственно необходимо использовать сетеполотна со все меньшим размером ячеек.

Естественно ожидать, что с уменьшением размера ячеек при том же диаметре микропроволоки и том же ее материале должны увеличиваться жесткость сетеполотна и усилия, необходимые для его растяжения. Уменьшить усилия можно, уменьшая жесткость полотна, которая зависит от диаметра и материала проводников. Однако как количественно влияет на жесткость сетеполотна изменение этих параметров, неясно. Знание таких количественных зависимостей в виде формулы значительно облегчило бы подбор материала микропроволоки и ее диаметра для создания ОП с заданными свойствами. Получить эти зависимости можно было бы, используя для расчета деформации сетеполотен нелинейную теорию упругости, как это было нами сделано для некоторых сравнительно несложных структур [2–6], но для более сложных структур применить эту теорию пока не удастся. Кроме того, имеется еще один недостаток использования этой теории – она не позволяет получить напрямую формулу зависимости деформационных свойств металлотрикотажа от вышеуказанных параметров и их сочетания. Для получения указанных зависимостей необходимо провести очень большое количество расчетов при всевозможных сочетаниях этих параметров, а затем обобщить результаты. Этот процесс трудоемок и потому малоэффективен.

В настоящей работе предлагается более простой метод.

Коэффициент отражения (по мощности) электромагнитной волны с длиной волны  $\lambda$  от тканевой сетчатой структуры с размером стороны ячейки  $a$  и диаметром проводника  $d$  определяется по формуле [7]

$$R = 1 / \left( 1 + \chi^2 \right), \text{ где } \chi = \frac{2a}{\lambda} \ln \frac{a}{\pi d}. \quad (1)$$

Эта формула показывает, что коэффициент отражения в структурах типа ткани зависит от отношения длины стороны ячейки к длине волны и от отношения длины стороны ячейки к диаметру проводника. В металлотрикотаже в отличие от тканевой структуры имеется набор ячеек с разными длинами сторон ячеек, поэтому данная формула не годится для расчета коэффициента отражения электромагнитных волн от него, однако и для металлотрикотажа коэффициент отражения, очевидно, должен зависеть от указанных отношений.

Пусть для длины волны  $\lambda$  электромагнитных волн подобрана структура металлотрикотажа, обладающая нужным коэффициентом отражения. Известны материал микропроволоки, ее диаметр, удельное усилие и относительное удлинение металлотрикотажа при раскрытии ОП. Теперь необходимо уменьшить в  $n$  раз длину волны. Чтобы коэффициент отражения при том же относительном удлинении остался примерно прежним, вся структура сетеполотна (в том числе диаметр микропроволоки) должна быть также уменьшена в  $n$  раз, оставаясь подобной предыдущей. Если при этом диаметр проводника уменьшим более чем в  $n$  раз, то в соответствии с формулой (1) коэффициент отражения уменьшится, при уменьшении диаметра проводника менее чем в  $n$  раз, коэффициент отражения увеличится.

Используя нелинейную теорию упругости и вышеупомянутый метод подобия, получили формулу, связывающую удельную нагрузку в исходном образце с удельной нагрузкой в образце с такой же, но уменьшенной структурой, с другим диаметром микропроволоки, изготовленной, к тому же, из другого металла.

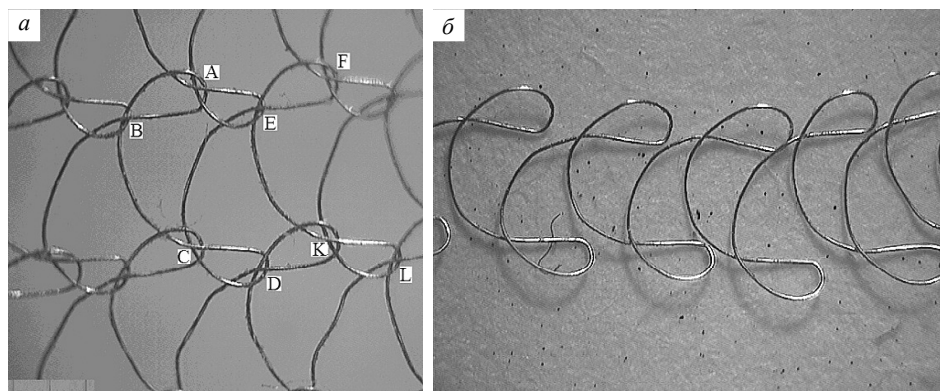
К сожалению, получить точное подобие исходной структуры при уменьшении ее размеров, диаметра микропроволоки и ее материала, как правило, не удастся из-за изменения деформации микропроволоки при взаимодействии с вязальными органами трикотажных машин (иглы, платины, ушковины) [8].

Перейдем теперь к более подробному изложению метода.

В трикотаже, а также и во многих других текстильных материалах, можно выделить сравнительно простой повторяющийся элемент, относительная деформация которого соответствует относительной деформации всего образца. Например, на рис. 1, *а* показана микрофотография металлического трикотажа, повторяющимся элементом в котором является элемент ABCD. Его аналогами будут элементы DCEF, FEKL и т.д. Деформация повторяющегося элемента и будет определять деформацию трикотажа.

Как показал анализ микрофотографий металлического трикотажа, многие элементы петель нерастянутого трикотажа можно аппроксимировать сочетанием частей окружностей различного радиуса и отрезками прямых линий. Такая форма элементов петли может быть получена как вследствие упругой, так и вследствие пластической деформации при изготовлении трикотажа. Чтобы выяснить, в каком состоянии находятся элементы петли металлического трикотажа после его изготовления, мы препарировали структуры металлического трикотажа (выделяли один из столбиков). В качестве примера такого препарирования на рис. 1, *б* приведена микрофотография микропроволоки, выделенной (препарированной) из сетеполотна, микрофотография которого при том же увеличении показана на рис. 1, *а*. Сравнение микрофотографий 1, *а* и 1, *б* показывает, что форма и размер петель мало меняются при освобождении микропроволоки от взаимодействия с другими микропроводами в структуре трикотажа. Это указывает на то, что микропроволока в металлическом трикотаже пластически деформирована. То же самое имеет место и в других металлических сетеполотнах. Поэтому в дальней-

шем при расчетах мы полагали, что элементы петли в нерастянутом металлическом трикотаже пластически деформированы и форма этой петли соответствует ее форме в нерастянутом трикотаже.



**Рис. 1.** Трико, закрытое одноребеночное (сталь Ø50 мкм):

*a* – взаимодействие элементов петельной структуры;

*б* – выделенный петельный столбик

**Fig. 1.** One-bar closed jersey (steel of Ø50 μm):

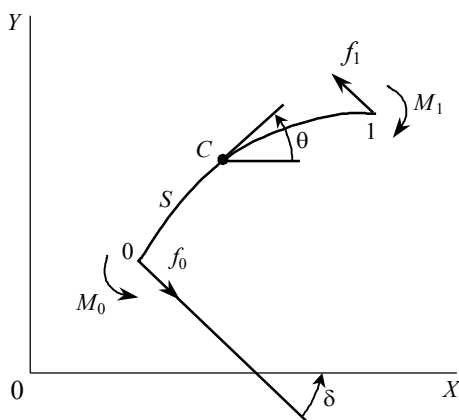
(*a*) interaction of the eyelet elements and (*b*) separated wale

Анализ микрофотографий двумерно деформированного металлического трикотажа также показал, что точки приложения сил к повторяющимся элементам при симметричной двумерной нагрузке (удельная нагрузка по горизонтали и вертикали одинакова) практически не перемещаются вдоль элементов петель. Следовательно, можно полагать, что силы при такой нагрузке приложены к одним и тем же точкам рассматриваемого элемента. Рассчитав относительную деформацию повторяющегося элемента, получим относительную деформацию всего образца. Поскольку микропроволока при деформации образца практически не растягивается, деформация полотна осуществляется, в основном, за счет изгиба микропроволоки.

Рассмотрим один из повторяющихся элементов в нерастянутом образце. Разделим его на несколько участков так, чтобы рассматриваемый участок имел во всех точках одну и ту же кривизну и чтобы при деформации образца сосредоточенные силы  $f_0$  и  $f_1$  и внешние изгибающие моменты  $M_0$ ,  $M_1$  при деформации образца были приложены только по концам 0 и 1 (рис. 2) рассматриваемого участка (они взяты с учетом действия отрезанных частей микропроволоки на участок 0–1), т.е. на участке отсутствуют распределенные силы.

В силу этого из условия равновесия участка имеем  $f_0 + f_1 = 0$  или  $f_0 = -f_1$ , т.е. силы  $f_0$  и  $f_1$  равны по величине и противоположны по направлению, абсолютную величину этой силы обозначим через  $f$ . Также равны по величине и противоположны по направлению моменты сил  $M_0$  и  $M_1$ . Нетрудно показать, что на концы остальных участков повторяющегося элемента должны действовать такие же силы и моменты, которые действуют на концы рассматриваемого участка повторяющегося элемента, т.е. они одинаковы для всех участков, на которые разбит повторяющийся элемент.

Введем угол  $\delta$ , отсчитываемый против часовой стрелки от направления силы  $f_0$  к оси  $X$ . Он для всех участков один и тот же и зависит от отношения величины удельных нагрузок, растягивающих образец по вертикали и по горизонтали. Начальную кривизну микропроволоки будем считать переменной по длине  $s$  повторяющегося элемента, но постоянной в пределах одного участка ( $s$  – это расстояние по микропроволоке от начальной точки повторяющегося элемента до рассматриваемой точки  $C$ ).



**Рис. 2.** Схематическое изображение одного из участков повторяющегося элемента  
**Fig. 2.** Schematic illustration of one of the repeating element regions

Будем считать структуру плоской, тогда для каждого участка можно записать следующее так называемое основное уравнение нелинейной теории упругости [9]:

$$d^2\theta/ds^2 - d^2\theta_0/ds^2 = -(f/H)\sin(\theta+\delta). \quad (2)$$

Здесь  $\theta$  и  $\theta_0$  – углы наклона касательной к упругой линии в произвольной точке  $C$  к оси  $OX$  в деформированном и недеформированном состояниях рассматриваемого участка нити,  $f$  – величина силы, действующей на концы выделенного участка,  $H$  – жесткость микропроволоки при изгибе.

Производные  $d\theta/ds$  и  $d\theta_0/ds$  определяют кривизну микропроволоки (величину, обратную радиусу кривизны) в данной точке в деформированном и в исходном состояниях. Производные  $d^2\theta/ds^2 = d(d\theta/ds)/ds$  и  $d^2\theta_0/ds^2 = d(d\theta_0/ds)/ds$  показывают, как быстро меняется первая производная (кривизна микропроволоки) по мере увеличения  $s$ .

Так как в каждом рассматриваемом участке кривизна постоянна, то постоянна и величина  $d\theta_0/ds$ , вследствие чего производная  $d(d\theta_0/ds)/ds = 0$  и уравнение (2) принимает вид

$$d^2\theta/ds^2 = -(f/H)\sin(\theta+\delta). \quad (3)$$

Пронумеруем все участки в повторяющемся элементе и перейдем от  $s$  к безразмерной переменной  $\tau$ . Выберем ее так, чтобы на каждом участке она менялась бы в пределах от 0 до 1. В связи с этим для первого участка примем  $\tau = s/l_1$  (в этом случае в начале участка  $s = 0$  и  $\tau = 0$ , в конце участка  $s = l_1$ , а  $\tau = 1$ ), для второго –  $\tau = (s-l_1)/l_2$  (в начале участка  $s = l_1$ ,  $\tau = 0$ , в конце участка  $s = l_1+l_2$ ,  $\tau = 1$ ), для третьего –  $\tau = (s - l_1 - l_2)/l_3$  (в начале участка  $s = l_1 + l_2$ ,  $\tau = 0$ , в конце участка

$s = l_1 + l_2 + l_3$ ,  $\tau = 1$ ) и т.д. Здесь  $s$  – текущие значения величины  $s$  для каждого участка,  $l_1, l_2, l_3, \dots$  – длина каждого участка.

После небольших преобразований уравнение (3) для произвольного  $i$ -го участка повторяющегося элемента преобразуется к виду

$$d^2\theta_i/d\tau_i^2 = -A_i \sin(\theta_i + \delta), \quad (4)$$

где  $A_i = f l_i^2/H$ ,  $i$  – номер участка,  $l_i$  – его длина.

Далее записываются краевые условия для начала и конца каждого участка, на которые разбит повторяющийся элемент, и условие их стыковки (оно является краевым условием для конца предыдущего участка и начала последующего). Условия стыковки также зависят только от безразмерных величин  $\tau_i$ ,  $R_i/l_i$  и т.д. Здесь  $R_i$ ,  $l_i$  – радиус кривизны и длина  $i$ -го участка.

Величина  $s$  определяет, на каком расстоянии от начала повторяющегося элемента находится рассматриваемая точка, а величина  $\tau_i$  – на какой доле длины  $i$ -го участка находится эта точка.

После решения записанных уравнений программа рассчитывает зависимость угла  $\theta$  от безразмерного параметра  $\tau$ . Если в исходной и в уменьшенной структурах величины  $A_i$  и  $\delta$  одинаковы, точки контактов не перемещаются и отношение удельных сил, растягивающих образцы по вертикали и горизонтали, одно и то же, то зависимости  $\theta$  от  $\tau$  для них будут полностью совпадать. В этом случае, как нетрудно показать, относительное удлинение для этих структур будет одинаково.

Пусть имеем два одинаковых квадратных образца с размером сторон  $L = 1$  м, первый с исходной структурой, а второй – со структурой, уменьшенной в  $n$  раз. Начнем первый образец растягивать в двух взаимно-перпендикулярных направлениях силой  $F_{1в}$  по вертикали и силой  $F_{1г}$  по горизонтали, другой – силой  $F_{2в}$  по вертикали и силой  $F_{2г}$  по горизонтали. При этом должно выполняться соотношение:  $F_{1в}/F_{1г} = F_{2в}/F_{2г}$ , иначе углы  $\delta$  в этих двух образцах будут различаться. Поскольку стороны образца равны 1 м, эти все силы являются удельными растягивающими силами. В дальнейшем мы при сравнении двух образцов не будем уточнять направление сил, будем их просто обозначать  $F_1$  или  $F_2$ , просто эти две силы должны быть либо обе направлены по вертикали, либо обе – по горизонтали.

Можно показать, что при растяжении образцов два любых аналогичных участка в них будут иметь одно и то же относительное удлинение, если для них выполняется условие

$$A_{1i} = A_{2i} \text{ или } f_1 l_{1i}^2/H_1 = f_2 l_{2i}^2/H_2. \quad (5)$$

В уравнении (5) подстрочные индексы 1 и 2 означают номера образцов, а  $i$  – номер аналогичных участков в этих образцах.

Такое же относительное удлинение будут иметь повторяющиеся элементы в этих образцах и сами эти образцы.

Число повторяющихся элементов, на которые распределена сила  $F_1$  в первом образце, обозначим  $N_1$ , во втором образце –  $N_2$ , причем величина  $N_2$  должна быть равна  $N_1 n$ , так как размеры элементов во втором образце в  $n$  раз меньше, чем в первом. Из-за этого же следует, что  $l_{2i} = l_{1i}/n$ . Отсюда  $f_1 = F_1/N_1$ ,  $f_2 = F_2/N_2 = F_2/(N_1 n)$ .

Подставляем полученные выражения в формулу (5) и после сокращения одинаковых множителей получим

$$F_2 = F_1 n^3 H_2/H_1.$$

Жесткость  $H$  микропроволоки на изгиб определяется формулой

$$H = kE\pi d^4/64.$$

Здесь  $E$  – модуль упругости,  $d$  – диаметр микропроволоки,  $k$  – число сложенных микропроволоки.

Подставляя  $H$  в верхнюю формулу, окончательно получаем

$$F_2 = \frac{k_2}{k_1} \frac{E_2}{E_1} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^4 n^3 F_1. \quad (6)$$

При  $k = 1$  под  $d$  здесь понимается обычный диаметр микропроволоки, а при  $k \neq 1$  так называемый эффективный диаметр  $d_{\text{эфф}}$ , который при  $k = 2$  рассчитывается по формуле [7]

$$d_{\text{эфф}} = 2\sqrt{dl \left[ 1 - 0,5 \left( \frac{d}{2l} \right)^{1,5} \right]}. \quad (7)$$

Здесь  $2l$  – расстояние между центрами проводников.

Погрешность этой формулы составляет 4 % при  $l \approx 1,1 r_o$  и меньше или равна 2 % при  $l > 1,5 r_o$ .

Формулу (6) можно применять как в случае симметричной, так и в случае несимметричной нагрузки, если при этом точки приложения сил при деформации не перемещаются по микропроволоке. Однако, даже если точка приложения сил по нити немного перемещается, эту формулу можно использовать для ориентировочных оценок.

Эта формула получена на основе анализа программы, разработанной нами для расчета деформации трикотажа при его двумерном нагружении. При разработке программы предполагалось, что при растяжении металлтрикотажа пластическая его деформация отсутствует или мала, хотя при вязании образца она присутствует. Программа была использована для расчета относительной деформации кулирного трикотажа и однострочечных трико открытое, трико закрытое [2–6]. Наблюдалось хорошее совпадение экспериментальных результатов и результатов, полученных расчетным путем по программе [2–6]. Это позволяет полагать, что если при растяжении образца дополнительная пластическая деформация микропроволок и появляется, но она мала и не играет существенной роли.

Формулу (6) удобно применять, например, в следующих двух случаях.

1. Нужно определить удельное растягивающее усилие в образце со структурой, уменьшенной в  $n$  раз, при той же относительной деформации и том же коэффициенте отражения, что и в исходном образце.

Для неизменности коэффициента отражения эффективный диаметр микропроволоки должен быть уменьшен в  $n$  раз. Формула (6) при этом принимает вид

$$F_2 = \frac{k_2}{k_1} \frac{E_2}{E_1} \frac{1}{n} F_1. \quad (8)$$

Пусть исходный образец изготовлен из стальной микропроволоки диаметром 50 мкм и к нему для создания заданного относительного удлинения прикладывается удельная нагрузка  $F_1$ . Уменьшим размеры элементов структуры, в том числе диаметр микропроволоки, в  $n$  раз, например в 2 раза. Какую удельную нагрузку нужно приложить ко второму образцу для создания в нем такого же относительного удлинения, если в нем использована стальная, вольфрамовая микропроволока при  $k_1 = k_2 = 1$ ? Для стали  $E_2 = E_1$ , для вольфрама  $E_2 = 2E_1$ . В результате, со-

гласно формуле (8), получаем для стали  $F_2 = F_1/2$ , для вольфрама  $F_2 = F_1$ . В обоих случаях диаметр микропроволоки  $d_2$  должен быть равен 25 мкм. При меньшем  $d_2$  коэффициент отражения будет меньше коэффициента отражения от первого образца, при большем  $d_2$  – наоборот.

2. Теперь во втором образце нужно при том же  $n$ , при той же относительной деформации и при любом коэффициенте отражения получить удельное растягивающее усилие, например, в 3 раза меньшее, чем в первом ( $F_2 = F_1/3$ ) при  $k_1 = k_2 = 1$ . Какой диаметр проводника должен быть взят при использовании стальной, вольфрамовой микропроволок?

Из формулы (6) получаем

$$d_2 = \sqrt[4]{\frac{F_2}{F_1} \frac{E_1}{E_2} \frac{1}{n^3}} d_1.$$

Для стальной микропроволоки

$$d_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{3} \frac{1}{1} \frac{1}{2^3}} d_1 = \frac{d_1}{\sqrt[4]{24}} \approx 22 \text{ мкм} < 25 \text{ мкм},$$

для вольфрамовой микропроволоки

$$d_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{3} \frac{1}{2} \frac{1}{2^3}} d_1 = \frac{d_1}{2\sqrt[4]{3}} \approx 19 \text{ мкм} < 25 \text{ мкм}.$$

В обоих случаях коэффициент отражения должен быть меньше, чем коэффициент отражения от первого образца, особенно во втором случае. Для него произведем оценку коэффициента отражения, используя формулы (1).

Для этого введем понятие эффективного размера стороны ячейки ( $a_{\text{эфф}}$ ). Под  $a_{\text{эфф}}$  будем понимать размер стороны ячейки в тканой металлической сетке, при котором эта сетка имеет такой же коэффициент отражения, как у нашего исходного образца. Пусть исходный образец, изготовленный из микропроволоки диаметром 50 мкм, при длине волны 3 см имеет коэффициент отражения 90 %. Согласно формуле (1), это соответствует  $a_{\text{эфф}} = 2$  мм. Уменьшим все элементы структуры образца, а следовательно, и эффективный размер стороны ячейки в 2 раза, и длину волны также уменьшим в 2 раза. При диаметре проводника 25 мкм коэффициент отражения согласно формуле (1) остается равным 90 %, а при диаметре проводника 19 мкм становится равным 88 %, т.е. хоть и уменьшился, но не существенно. В случае стальной микропроволоки он уменьшится еще слабее.

Отсюда вывод – изменение диаметра проводника мало влияет в данных условиях на коэффициент отражения и формулу (6) можно использовать при подборе параметров микропроволок для получения металлотрикотажа с заданным удельным усилием растяжения, не учитывая в первом приближении изменения коэффициента отражения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Кудрявин Л.А., Подшивалов С.Ф., Халиманович В.И. Трикотажные металлические сетеполотна для отражающей поверхности трансформируемых наземных и космических антенн // Технический текстиль. 2007. № 16. С. 59–64.
2. Кудрявин Л.А., Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Котович О.С. Применение нелинейной теории упругости к расчету двумерной деформации трикотажа // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 8. С. 69–72.
3. Кудрявин Л.А., Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Котович О.С. Расчет двумерной деформации трикотажа // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 1. С. 80–83.

4. Кудрявин Л.А., Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Котович О.С. Расчет деформации трико одностороннее открытое // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 2. С. 57–60.
5. Кудрявин Л.А., Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Котович О.С. Расчет деформации трико одностороннее закрытое // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 3. С. 75–78.
6. Кудрявин Л.А., Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Заваруев Н.В. Расчет деформации кулирного трикотажа при симметричной двумерной нагрузке с помощью нелинейной теории упругости // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. № 5. С. 74–77.
7. Конторович М.И., Астрахан М.И., Акимов В.П. и др. Электродинамика сетчатых структур / под ред. М.И. Конторовича. М.: Радио и связь, 1987. 136 с.
8. Шалов И.И., Далидович А.С., Кудрявин А.А. Технология трикотажного производства. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 296 с.
9. Попов Е.П. Теория и расчет упругих стержней. М.: Наука, 1986. С. 294.

Статья поступила: 29.05.2017 г.

Khalimanovich V.I., Kudryavin L.A., Belyaev O.F., Zavaruev V.A. (2017) APPLICATION OF THE NONLINEAR THEORY OF ELASTICITY AND SIMILARITY METHOD FOR ASSESSMENT OF THE METALLIC JERSEY DEFORMATION PROPERTIES *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 49. pp. 105–113

DOI 10.17223/19988621/49/10

Earlier, a two-dimensional deformation of the square knitwear samples made of the microwires have been experimentally investigated under condition of the equal forces acting in the two mutually perpendicular directions. It has been found that the contact points between the structural elements in these samples stay almost immovable along the microwire. We have developed a computer program for calculating the two-dimensional deformation of such samples. It is based on the nonlinear theory of elasticity taking into account the current observation. The theoretical calculations obtained for several structures have been shown to be in a good agreement with experimental data. The program code has been analyzed in order to determine the influence of structure parameters on the deformation properties of the samples. It has been shown that if the two structures are similar, the samples are of the same size, but the size of the elements in the second structure is  $n_1$  times smaller and the microwire rigidity on the bend is  $n_2$  times larger than that in the first one. Therefore, to obtain the same sizes of the sample after deformation, the force acting on the second sample should be  $n_1^3 \cdot n_2$  times greater than that acting on the first sample.

It has been found that the simultaneous decrease in dimensions of the structure elements and in the wavelength by an equal number of times does not lead to the significant changes in reflection coefficient.

Keywords: metallic jersey, reflective surface, reflection coefficient of electromagnetic waves, similarity method, nonlinear theory of elasticity.

*KHALIMANOVICH Vladimir Ivanovich* (Candidate of Physics and Mathematics, JSC "Information Satellite Systems" named after Academician M.F. Reshetnev, Zheleznogorsk, Russian Federation)

*KUDRYAVIN Lev Aleksandrovich* (Doctor of Technical Science, Professor, Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russian Federation)

*BELYAEV Oleg Fedorovich* (Doctor of Physics and Mathematics, Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russian Federation).

E-mail:vlzavaruev@yandex.ru

*ZAVARUEV Vladimir Andreevich* (Doctor of Technical Science, Professor, Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russian Federation)

E-mail:vlzavaruev@yandex.ru



## REFERENCES

1. Belyaev O.F., Zavaruev V.A., Kudryavin L.A., Podshivalov S.F., Khalimanovich V.I. (2007) Trikotazhnye metal-licheskie setepolotna dlya otrazhayushchey poverkhnosti transformiruemyykh nazemnykh i kosmicheskikh antenn [Metal jersey for reflecting surface of the ground and space transformable antennas]. *Tekhnicheskij tekstil' – Technical Textile*. 16. pp. 59–64.
2. Kudryavin L.A., Belyaev O.F., Zavaruev V.A., Kotovich O.S. (2010) Primenenie nelineynoy teorii uprugosti k raschetu dvumernoy deformatsii trikotazha [Application of the nonlinear theory of elasticity to the calculation of two-dimensional deformation of jersey]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Textile Industrial Technology*. 8. pp. 69–72.
3. Kudryavin L.A., Belyaev O.F., Zavaruev V.A., Kotovich O.S. (2011) Raschet dvumernoy deformatsii trikotazha [Calculation of two-dimensional deformation of jersey]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Textile Industrial Technology*. 1. pp. 80–83.
4. Kudryavin L.A., Belyaev O.F., Zavaruev V.A., Kotovich O.S. (2011) Raschet deformatsii triko odnogrebenochnoe otkrytoe [Calculation of the deformation of one-bar open jersey]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Textile Industrial Technology*. 2. pp. 57–60.
5. Kudryavin L.A., Belyaev O.F., Zavaruev V.A., Kotovich O.S. (2011) Raschet deformatsii triko odnogrebenochnoe zakrytoe [Calculation of the deformation of one-bar closed jersey]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Textile Industrial Technology*. 3. pp. 75–78.
6. Kudryavin L.A., Belyaev O.F., Zavaruev V.A., Zavaruev N.V. (2013) Raschet deformatsii kulirnogo trikotazha pri simmetrichnoy dvumernoy nagruzke s pomoshch'yu nelineynoy teorii uprugosti [Calculation of the deformation of metal jersey under two-dimensional symmetric loading with the use of nonlinear theory of elasticity]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti – Textile Industrial Technology*. 5. pp. 74–77.
7. Kontorovich M.I., Astrakhan M.I., Akimov V.P., et al. (1987) *Elektrodinamika setchatykh struktur* [Electrodynamics of knitted structures]. Moscow: Radio i svyaz'.
8. Shalov I.I., Dalidovich A.S., Kudryavin A.A. (1984) *Tekhnologiya trikotazhnogo proizvodstva* [Textile manufacturing technology]. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost'.
9. Popov E.P. (1986) *Teoriya i raschet uprugikh sterzhney* [Theory and calculation of elastic rods]. Moscow: Nauka.