

В. В. Лаврешов, Л. П. Малый, Е. В. Ковалев, Е. Н. Крамаренко, Д. С. Омельченко

НАМОТКА ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ШТЫРИ

Использование труб прямоугольного сечения из композиционных материалов находит все большее распространение. Намотка труб без использования штырей для малых углов намотки имеет ряд недостатков. Технология намотки через штыри лишена этих недостатков. В статье приведена разработанная авторами методика расчета программ намотки труб прямоугольного сечения из композиционных материалов с использованием штырей. Для обеспечения сплошности намотки штыри у основания должны иметь одинаковые расстояния между собой. Наружный диаметр гребенки выбирается с запасом, учитывая жгутование ленты на штырях. Определяется схема намотки на целый слой в виде таблицы, в которой указано расположение ленты между штырями передней и задней гребенок при намотке слоя для каждого витка. Затем определяются координаты станка. Для этого необходимо знать углы закрутки витка, соответствующие углы поворота оправки в определенных координатах x , координаты точки схода ленты, угол наклона свободного участка ленты. Затем из геометрических соображений необходимо получить компоненты орта касательной к траектории армирования и непосредственно координаты исполнительных органов станка. В результате получаем таблицу координат исполнительных органов станка при намотке первого витка (при прямом и обратном ходе). Используя приведенную логику, аналогично легко получить для всех витков координаты исполнительных органов станка. По данной методике разработана система автопрограммирования «Виток» в среде MathCad. Система «Виток» использовалась при разработке программ намотки для трубы 28x28x2 мм по теме «Січ-2М». Программы успешно отработали. Опытные образцы труб намотаны. Работа по намотке труб прямоугольного сечения из композиционного материала для получения конструкции с нулевым коэффициентом линейного термического расширения проводилась авторами.

Ключевые слова: траектория армирования, раскладывающий ролик, гребенка, схема намотки, угол закрутки, координаты исполнительных органов станка.

Використання труб прямокутного перерізу із композиційних матеріалів дедалі більше поширюється. Намотування труб без використання штирів для малих кутів намотування має ряд недоліків. Технологія намотування з використанням штирів позбавлена цих недоліків. У статті наведено розроблену авторами методику розрахунку програм намотування труб прямокутного перерізу із композиційних матеріалів з використанням штирів. Для забезпечення суцільності намотування штирі біля основи повинні мати однакові відстані між собою. Зовнішній діаметр гребінки вибирають із запасом, урахувавши джутовування стрічки на штирях. Визначають схему намотування на весь шар, яка являє собою таблицю, в якій зазначено розміщення стрічки між штирями передньої та задньої гребінки у процесі намотування шару для кожного витка. Далі визначають координати верстата. Для цього необхідно знати кути закручування витка, відповідні кути повороту оправки у визначених координатах X , координати точки сходу стрічки, кут нахилу вільного відрізка стрічки. Далі із геометричних міркувань отримують компоненти орта дотичної до траєкторії армування та безпосередньо координати виконавчих органів верстата. У результаті отримують таблицю координат виконавчих органів верстата у процесі намотування першого витка (під час прямого і зворотного ходу). Використовуючи наведену логіку, аналогічно легко отримати для всіх витків координати виконавчих органів верстата. За цією методикою розроблено систему автопрограмування «Виток» у середовищі Mathcad. Систему «Виток» використано під час розроблення програм намотування для труби 28x28x2 мм за темою «Січ-2М». Програми успішно відпрацювали. Дослідні зразки труб намотано. Роботу з намотування труб прямокутного перерізу із композиційного матеріалу для отримання конструкції з нульовим коефіцієнтом лінійного термічного розширення проводили автори.

Ключові слова: траєкторія армування, розкладальний ролик, гребінка, схема намотування, кут закручування, координати виконавчих органів верстата.

The tubes of rectangular section made of composite material find ever-growing use. Winding of tubes without using dowels for small winding angles has a number of disadvantages. The technology of winding through dowels does not have these disadvantages. The paper presents the authors-developed calculation technique for programs of winding the tubes of rectangular section made of composite materials using dowels. To ensure winding continuity, the dowels at base must have equal distances between them. The external diameter of comb is selected with margin taking into account band stranding on the dowels. The scheme of winding on entire layer is determined that represents a table which indicates band position between the dowels of front and rear comb during winding a layer for each coil. Then the coordinates of machine tool are determined. For this purpose, we determine the angles of coil winding, corresponding angles of mandrel turn in determined coordinates X , the coordinates of band escape point, angle of inclination of free section of band,

then from geometrical considerations we obtain the components of unit vector of tangent to reinforcing trajectory and directly the coordinated of machine tool actuators. As a result, we obtain the table of coordinates of machine toll actuators during winding of the first coil (at forward and back travel). Using the presented logics, similarly it is easy to obtain for all coils the coordinates of machine tool actuators. According to this technique, the Vitok auto-programming system was developed in MathCad environment. The Vitok system was used during development of winding program for tube 28x28x2 mm under Sich-2M program. The programs operated successfully. The test samples of tubes were wound. The authors performed winding of the tubes of rectangular section made of composite material to obtain a structure with zero linear thermal expansion coefficient.

Key words: reinforcing trajectory, laying roller, comb, winding scheme, winding angle, coordinates of machine tool actuators.

Введение

В статье «Методика расчета программ намотки труб прямоугольного сечения» (Космическая техника. Ракетное вооружение, №1, 2018 г.) рассказывалось о принципе расчета программ намотки труб прямоугольного сечения без использования штырей. Соответствующие программы работоспособны, но для малых углов намотки, менее 25° , у такой технологии следующие недостатки:

- большая длина переходных участков (эти участки обрезаются в готовом изделии, следовательно, уменьшается коэффициент использования материала);

- необходима оправка большой длины с учетом переходных участков;

- свободный участок ленты перед разворотом витка имеет большую длину, а в момент разворота – в несколько раз меньшую, что приводит к провисанию ленты (компенсаторы станка не справляются).

Этих недостатков при малых углах намотки лишена технология намотки через штыри.

Постановка задачи

Геометрия оправки

Пусть имеется оправка для намотки трубы прямоугольного сечения (рис. 1). Передние штыри образуют переднюю гребенку, задние штыри – заднюю гребенку.

На рис. 1 приведены размеры для конкретности рассуждений. Вообще, эти размеры могут быть любыми, ограничивающимися только возможностями намоточного

станка. Намотка должна быть проведена на части оправки, расположенной между штырями. Размер x выбирается из условий возможности разворота головки раскладчика за штырями.

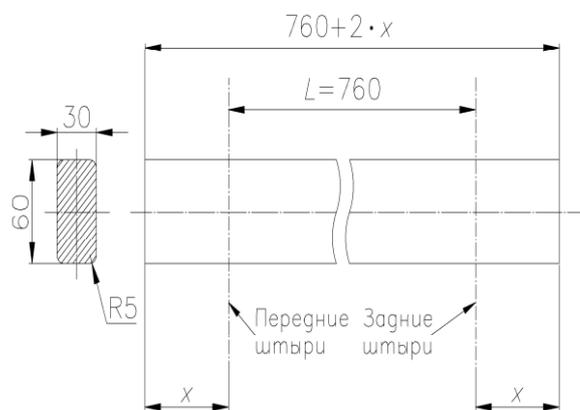


Рис. 1. Геометрические параметры оправки для намотки трубы

Траектория армирования

Угол намотки α , определяющий траекторию армирования, постоянен по длине трубы и, к примеру, пусть будет равен 5° .

Траектория раскладывающего ролика

Для расчета программы намотки необходима траектория раскладывающего ролика, которая имеет вид, приведенный на рис. 2.

Раскладывающий ролик движется в плоскости XZ. Траектория выбирается программистом произвольно. Однако качество программы будет зависеть от выбранной траектории. В разработанной автором системе автопрограммирования траектория ролика задается двумя параметрами:

- ZZT – расстояние до оси оправки (зададим $ZZT=90$ мм);

- $Smesch$ – смещение раскладчика за штыри (зададим $Smesch=50$ мм).

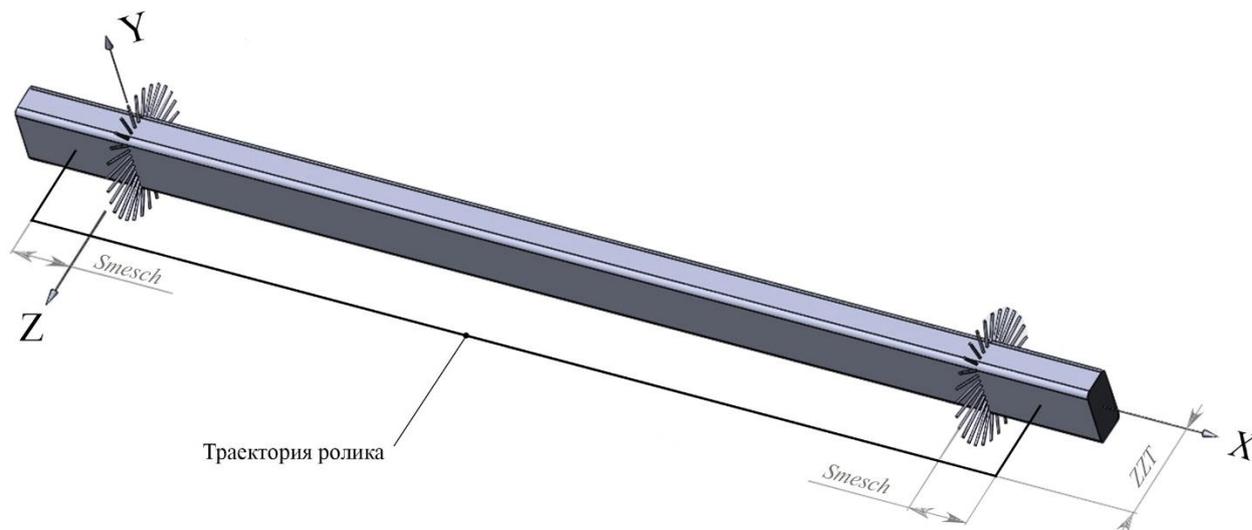


Рис. 2. Оси координат и траектория раскладывающего ролика

Расстановка штырей

Поскольку при обматывании штыря лента сильно жгутуется (уменьшается ширина ленты по отношению к расчетной), желательнее, чтобы лента состояла из одного волокна (в случае углепластика) или жгута (в случае органопластика).

Для обеспечения сплошности намотки (отсутствия зазора между укладываемыми лентами) штыри у основания должны иметь одинаковые расстояния между собой (рис. 3), и это расстояние

$$Shag = B / \cos(\alpha),$$

где $Shag$ – расстояние между штырями у основания; B – ширина ленты; α – угол намотки.

Например, если ширина ленты $B=6,1$ мм, то расстояние между штырями у основания при намотке с углом 5°

$$Shag = 6,1 / \cos(5^\circ) = 6,123 \text{ мм.}$$

Периметр оправки (рис. 1)

$$\begin{aligned} Perimetr &= 2 \cdot [30 + 60 - 5 \cdot (4 - \pi)] = \\ &= 171,416 \text{ мм.} \end{aligned}$$

В этом случае необходимо следующее количество штырей:

$$\begin{aligned} n_{\text{штыр}} &= \text{Round}(Perimetr / Shag) = \\ &= \text{Round}(171,416 / 6,123) = 28 \text{ шт.,} \end{aligned}$$

где Round – функция округления до ближайшего целого.

У вершины (для простоты расчета) штыри должны быть равномерно распределены по окружности. Расстояния между центрами штырей у их основания одинаковы для всех штырей (рис. 3).

Наружный диаметр гребенки (рис. 3) указан 110 мм. Он может меняться в зависимости от количества наматываемого материала, который необходимо выбирать с запасом, учитывая жгутование ленты на штырях.

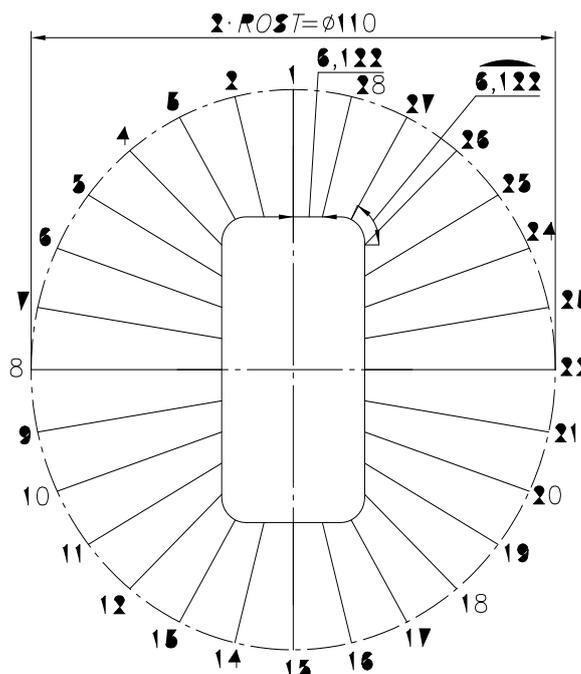


Рис. 3. Расположение штырей: ROST – наружный радиус гребенки

Основные принципы, заложенные в расчет

Схема намотки

Для начала необходимо определить схему намотки. Схема должна состояться на целый слой (табл. 1).

Таблица 1

Схема намотки слоя

№ витка	Передние штыри, номер штыря	Задние штыри, номер штыря		Передние штыри, номер штыря
		11	25	
1	1	11	25	7
2	21	3	17	27
3	13	23	9	19
4	5	15	1	11
5	25	7	21	3
6	17	27	13	23
7	9	19	5	15
8	2	12	26	8
9	22	4	18	28
10	14	24	10	20
11	6	16	2	12
12	26	8	22	4
13	18	28	14	24
14	10	20	6	16
15	3	13	27	9
16	23	5	19	1
17	15	25	11	21
18	7	17	3	13
19	27	9	23	5
20	19	1	15	25
21	11	21	7	17
22	4	14	28	10
23	24	6	20	2
24	16	26	12	22
25	8	18	4	14
26	28	10	24	6
27	20	2	16	26
28	12	22	8	18
1	1	11	25	7

Соображения для построения табл. 1 следующие:

- 1) намотку начинаем со штыря 1 (начальный номер штыря 1-го витка);
- 2) определяем, между какими задними штырями ляжет лента.

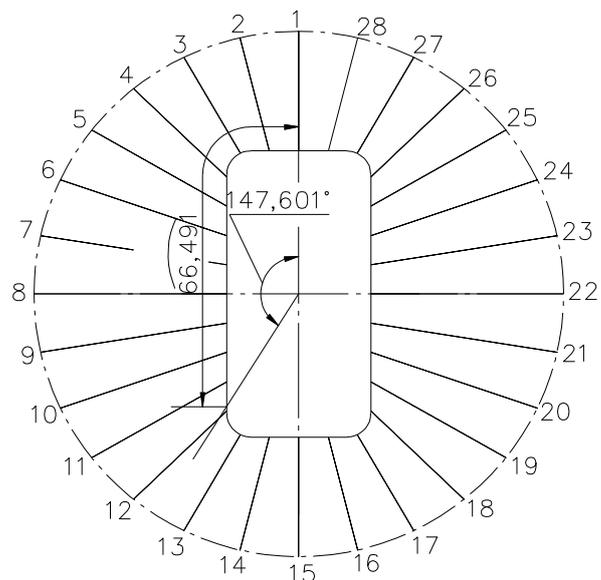
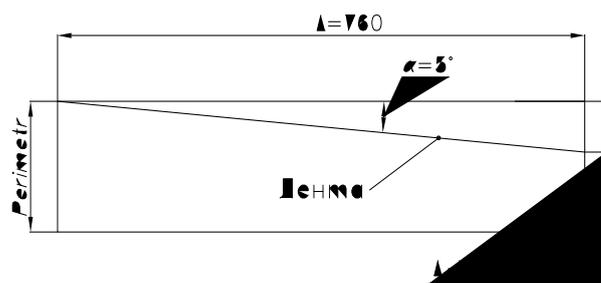


Рис. 4. Определение номера штыря на задней гребенке

Из рис. 4 видно, что лента в плоскости задних штырей ляжет между штырями 11 и 12, что отображено в табл. 1 (номер витка 1, колонка 3). Поворачиваем оправку на 180°, что соответствует 14 штырям. Итого 11+14=25, что отображено в табл. 1 (номер витка 1, колонка 4).

Переход от задних штырей к передним в разнице по штырям будет таким же, как на прямом ходу – 10 штырей. Следовательно, значение последней колонки первого витка

$$\text{mod}((25+10), 28) = 7,$$

где mod – функция, вычисляющая остаток от деления.

Далее, используя ту же логику, заполняем остальные строки таблицы.

Расчет движения исполнительных органов станка

Для начала разобьем все расстояние по координате x между штырями на равные отрезки. Координаты этих отрезков определим следующим образом:

$$x_i = \frac{L \cdot (i-1)}{n-1},$$

где L – расстояние между гребенками; n – количество отрезков; i – порядковый номер отрезка.

Определим угол закрутки витка для каждого значения x_i по формуле

$$\beta_i = US_DKT(x_i \cdot \text{tg}(\alpha)),$$

где $US_DKT(x)$ – функция определения угла закрутки от длины кромки трубы в сечении от нулевого положения (рис. 4). В рамках данной статьи эта функция детально не освещается.

Далее определяем для каждого β_i угол поворота оправки

$$\eta_i = UGOTUG(\beta_i), \quad (1)$$

где $UGOTUG(\beta)$ – функция определения угла поворота оправки от нулевого положения по известному угловому положению точки схода. В рамках данной статьи эта функция детально не освещается.

По углу поворота оправки определяем y_i , z_i , ξ_i с помощью процедуры, на выходе имеющей массив $koorts1(p, \varepsilon, ZZZ, \eta)$,

где y_i – координата Y точки схода ленты;

z_i – координата Z точки схода ленты;

ξ_i – угол наклона свободного участка ленты в проекции на плоскость YZ ;

p – параметр, определяющий точку схода;

ε – точность сравнения углов.

В рамках данной статьи эта процедура детально не освещается.

Зная эти величины, можно для каждого i -того значения поставить в соответствие положение пяти координат исполнительных органов станка (рис. 5).

Из геометрических соображений имеем:
– компоненты орта касательной к траектории армирования:

$$\tau_x(\alpha) = \cos(\alpha);$$

$$\tau_y(\alpha, \xi) = -\sin(\alpha) \cdot \sin(\xi);$$

$$\tau_z(\alpha, \xi) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\xi).$$

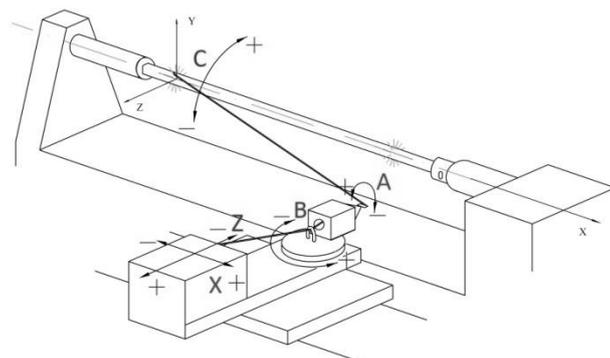


Рис. 5. Координаты станка

Координаты станка (вывод не приводится)

$$X_i^c(\alpha) = x_i - y_i \cdot \frac{\tau_x(\alpha)}{\tau_y(\alpha, \xi)}; \quad (2)$$

$$Z_i^c(\alpha) = z_i + (X_i^c - x_i) \cdot \frac{\tau_z(\alpha, \xi)}{\tau_x(\alpha)} + Raskl, \quad (3)$$

где $Raskl = 390$ мм – длина раскладчика;

$$C_i^c = \eta_i + \sum_{j=1}^{i-1} (\eta_{j+1} - \eta_j) \text{ для } i = 2 \dots n \quad (4)$$

(для $i=1$ $C_i^c = \eta_i$);

$$B_i^c = 0; \quad (5)$$

$$A_i^c(\alpha) = -\arctg\left(\frac{\tau_x(\alpha)}{\tau_y(\alpha, \xi)}\right). \quad (6)$$

Например, если мы возьмем $n=20$, то таблица координат станка будет выглядеть, как представлено в табл. 2.

Таблица 2

Координаты исполнительных органов станка

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
969,87	480	340,53	0	88,33
969,87	480	340,53	0	88,33
969,87	480	340,53	0	88,33
969,87	480	340,53	0	88,33
1203,04	480	377,73	0	88,28
1440,15	480	422,53	0	88,84
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16

Продолжение табл. 2

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16
1504,14	480	440,41	0	89,16

Как видно из табл. 2, ролик не лежит на заданной траектории (с учетом того, что

$B^c=0$, координата X^c должна быть не больше $L+Smesch=810$).

Для того чтобы понять дальнейший ход рассуждений, рассмотрим рис. 6. На нем показано положение оправки, соответствующее первой строке табл. 2. Свободный участок ленты пересекает плоскость, перпендикулярную оси вращения оправки с координатой $L+Smesch=810$ в точке O . При этом расстояние от оси вращения до точки пересечения равно r , а угол между плоскостью, в которой движется ролик, и перпендикуляром из точки O на ось вращения – Ω .

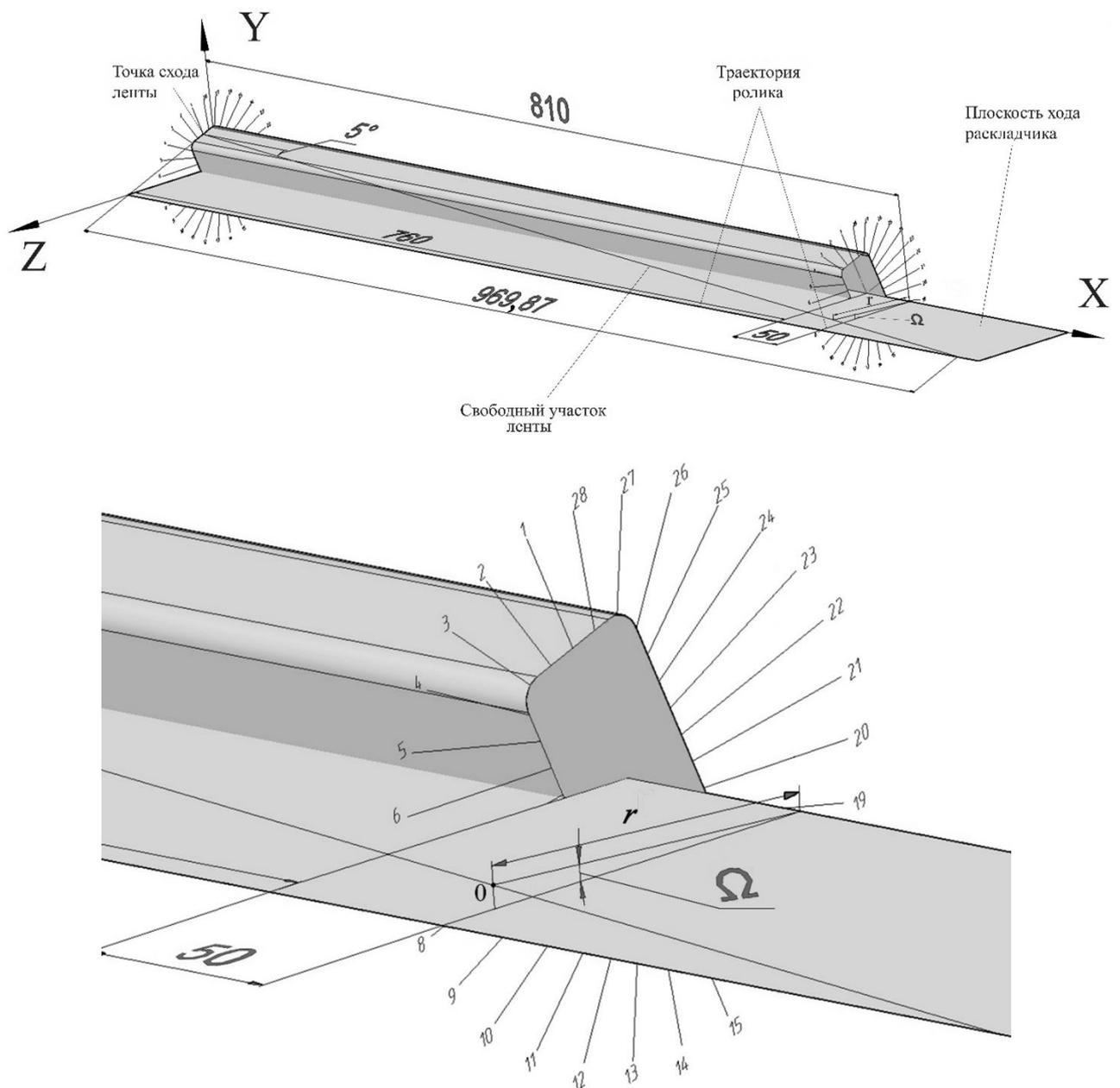


Рис. 6. Корректировка витка

Если повернуть оправку на угол Ω против хода ее вращения, то положение ролика окажется на заданной траектории с координатами

$$x_r \equiv X^c = L + Smesch = 810$$

(для четырехкоординатной намотки);

$$z_r \equiv Z^c - Raskl = r;$$

$$C^c = C^c - \Omega;$$

$$B^c = 0;$$

$$A^c = -\arctg\left(\frac{\tau_x(\alpha)}{\tau_y(\alpha, koortsl(1, 0, 0001, r, C^c)_{1,3})}\right).$$

Остается найти эти два параметра r и Ω .

Определим координаты точки O:

$$x^o = L + Smesch;$$

$$y^o = y + \frac{-y}{X^c - x} \cdot (x^o - x);$$

$$z^o = z + \frac{z - ZZT}{X^c - x} \cdot (x^o - x).$$

Тогда $r = \sqrt{(z^o)^2 + (y^o)^2};$

$$\Omega = \arcsin\left(\frac{y^o}{r}\right).$$

Начинаем построчно модернизировать табл. 2 вышеуказанным образом. После преобразования каждой строки проверяем расстояние от точки пересечения ленты с плоскостью штырей до оси вращения оправки $RuSt$.

Расчет останавливаем, когда $RuSt-\Delta$ окажется меньше $ROST$ (определение $ROST$ – рис. 3). Здесь под $\Delta=2$ подразумевается размер гарантированного зазора между свободным участком ленты и концами штырей.

Результат модификации табл. 2 представлен в табл. 3. Последняя строка в ней не нужна и приведена для того, чтобы показать, что $RuSt-2=53,2$ меньше $ROST=55$.

Удалим из табл. 3 повторяющиеся строки (появление повторяющихся строк происходит, когда намотка идет по плоской грани).

Таблица 3

Результат модификации табл. 2 с целью обеспечения заданной траектории движения ролика

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c	$RuSt$
810	466,954299	337,055346	0	89,65762	72,945899
810	466,954299	337,055346	0	89,65762	72,945899
810	466,954299	337,055346	0	89,65762	72,945899
810	466,954299	337,055346	0	89,65762	72,945899
810	448,895337	366,168959	0	89,649662	55,218242

В результате получаем табл. 4.

Таблица 4

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c	$RuSt$
810	466,954299	337,055346	0	89,65762	72,945899

Для того чтобы развернуть виток в обратную сторону, необходимо завести ленту между штырями в соответствии с табл. 1. Поскольку текущий виток первый, то номера штырей, между которыми заведется лента, 11 и 12 (см. табл. 1). Для этого повернем оправку так, чтобы точка пересечения свободного участка ленты с плоскостью штырей при движении раскладывающего ролика по заданной траектории в момент, когда она пересекает радиус $ROST$, находилась посередине между штырями 11 и 12. Чтобы найти такое положение оправки, для начала определим положение точки схода ленты с нее в зависимости от ее угла поворота:

$$x_{сл}(\eta) = \frac{\text{mod}(\text{DLL}(\text{BETA}(\eta, ZZT, 1)), \text{Perimetr})}{\text{tg}(S^o)};$$

$$y_{сл}(\eta) = koortsl(1, 0, 0001, z_r, \eta)_{1,2};$$

$$z_{сл}(\eta) = -koortsl(1, 0, 0001, z_r, \eta)_{1,1},$$

где $\text{BETA}(\eta, ZZT, 1)$ – функция определения угла закрутки витка от угла поворота

оправки. В рамках данной статьи эта функция детально не освещается.

Угол положения биссектрисы δ между штырями 11 и 12 к горизонту в зависимости от угла поворота оправки вычислим по формуле

$$\delta(\eta, i) = \text{mod}(\eta, 360) + 90 - \frac{360}{n_{\text{штыр}}} \cdot (i - 0,5), \quad (7)$$

где i – номер штыря (в данном случае $i=11$).

Угол перпендикуляра, проведенного из точки пересечения свободного участка ленты с плоскостью штырей на ось вращения оправки с горизонтальной плоскостью от угла поворота оправки,

$$\chi(\eta) = \arcsin \left(\frac{y_{\text{сл}} - \frac{y_{\text{сл}} \cdot (L - x_{\text{сл}})}{L + S_{\text{mesch}} - x_{\text{сл}}}}{ROST} \right).$$

Далее решаем уравнение

$$\delta(\eta, 11) - \chi(\eta) = 0. \quad (8)$$

В нашем случае решение уравнения – $\eta=407,921157^\circ$.

Полученное значение записываем в табл. 4 и получаем табл. 5.

Таблица 5

Координаты исполнительных органов станка

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762

Заводим ленту между штырями 11 и 12, для этого по координате Z подъезжаем к оправке на минимальное расстояние, например до 37 мм (для справки: радиус описанной окружности ≈ 32 мм). Перепишем табл. 5 в табл. 6.

Далее в соответствии со схемой армирования нам нужно повернуть оправку так, чтобы на обратном ходу лента прошла между штырями 25 и 26 (см. табл. 1).

Таблица 6

Координаты исполнительных органов станка

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762

Пояснения для расчета поворота представлены на рис. 7.

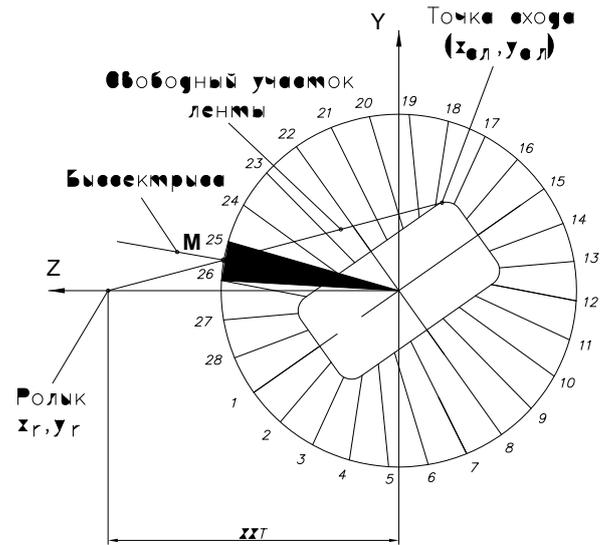


Рис. 7. Пояснения для вывода поворота оправки

Угол наклона биссектрисы вычисляется из уравнения (7)

$$\delta(\eta, i) = \arcsin \left(\frac{Y_M}{ROST} \right),$$

где Y_M – ордината точки пересечения свободного участка ленты с окружностью штырей (точка М).

В окончательном виде эта формула выглядит так:

$$\eta = \frac{360}{n_{\text{штыр}}} \cdot (i - 0,5) + \arcsin \left(\frac{\lambda + k \cdot \sqrt{ROST^2 \cdot (1 + k^2) - \lambda^2}}{ROST \cdot (1 + k^2)} \right) - 90, \quad (9)$$

где $\lambda = \frac{z_{\text{сл}} \cdot y_{\text{сл}}}{z_r - z_{\text{сл}}} + y_{\text{сл}}$;

$$k = -\frac{y_{\text{сн}}}{z_r - z_{\text{сн}}}$$

Считать по этой формуле нужно методом последовательных приближений. Сначала задаемся произвольным значением угла поворота оправки η , считаем k и λ , и по формуле определяем новое значение η . Эту операцию проделываем до тех пор, пока новое значение η будет отличаться от предыдущего на допустимую погрешность.

В нашем случае это угол $\eta=234,930945^\circ$. В табл. 6 последнее значение угла поворота – $407,921157^\circ$. Новое значение угла поворота не может быть меньше предыдущего, поэтому к значению $\eta=234,930945^\circ$ добавим минимальное количество периодов (360°), чтобы значение было больше $407,921157^\circ$:

$$\eta=234,930945^\circ+360^\circ=594,930945^\circ.$$

Во время этого поворота оправки необходимо развернуть головку раскладчика до

$$A^c = -\arctg\left(\frac{\tau_x(\alpha)}{\tau_y(\alpha, \xi)}\right) = -89,164604 \quad (10)$$

где $\alpha=180-\alpha$ для обратного хода;

ξ берется для угла поворота оправки $\eta=620,405932^\circ$ (см. ниже выражение 11).

Запишем очередную строчку в табл. 6, используя значения углов поворота оправки и головки раскладчика, рассчитанные по формулам (9), (10), в результате получим табл. 7.

Таблица 7

Координаты исполнительных органов станка

X ^c	Z ^c	C ^c	B ^c	A ^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762
810	427	497,921157	0	89,65762
810	480	594,930945	0	-89,164604

Обратный ход витка начинаем с поворота оправки, когда точкой схода является штырь 25 (см. табл. 1).

Этот угол поворота определим так:

$$\eta = \text{UGOTUG}(URST_{25}) + 360 \times \text{ceil}\left(\frac{594,930945 - \text{UGOTUG}(URST_{25})}{360}\right) = 620,579084 \quad (11)$$

где ceil – функция округления до большего целого; $URST$ – массив значений углов расположения основания штырей от нулевого положения (расположение 1-го штыря).

Расчет обратного хода проводится аналогично тому, как вели расчет прямого хода.

Разбивка по координате x проведена при расчете прямого хода $x_i=L-x_i$.

Угол закрутки витка определим для каждого значения x_i :

$$\beta_i = \text{US_DTK}((L - x_i) \cdot \text{tg}(\alpha) + \text{DLL}(URST_{25})),$$

где $\text{DLL}(\beta)$ – функция определения длины кромки сечения оправки от начального положения до угла закрутки β .

Угол поворота оправки определяем по формуле (1).

По формулам (2)-(6) определяем координаты исполнительных органов станка, но вместо угла α подставляем угол $180-\alpha$.

Получаем табл. 8, аналогичную табл. 2, для обратного хода витка.

Таблица 8

Координаты исполнительных органов станка на обратном ходу витка

X ^c	Z ^c	C ^c	B ^c	A ^c
-44,39227	480	620,405932	0	-89,164604
-44,39227	480	620,405932	0	-89,164604
-44,765953	480	620,530496	0	-89,160394
-176,842211	480	649,919226	0	-88,422211
-398,71255	480	685,775798	0	-88,237597
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-489,7711	480	700,52878	0	-88,329563
-630,942766	480	723,09594	0	-88,223365
-880,752067	480	765,446104	0	-88,575617
-1024,038773	480	800,405932	0	-89,164604
-1024,038773	480	800,405932	0	-89,164604
-1024,038773	480	800,405932	0	-89,164604
-1024,038773	480	800,405932	0	-89,164604

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
-1024,038773	480	800,405932	0	-89,164604
-1024,038773	480	800,405932	0	-89,164604
-1024,038773	480	800,405932	0	-89,164604

Положение точки схода определяем по формулам (12), (13).

$$x_{ct}(\eta) = L + \frac{\text{mod}(\text{DLL}(\text{BETA}(\eta, \text{ZZT}, 1)) - \text{DLL}(\text{BETA}(620,405932, \text{ZZT}, 1)), \text{Perimetr})}{\text{tg}(180 - \alpha)}; \quad (12)$$

$$y_{ct}(\eta) = \text{koorts1}(1, 0,0001, z_r, \eta)_{1,2}.$$

(13)

Корректировку табл. 8 осуществляем аналогично, как для прямого хода витка по формулам (14) – (23).

$$x_r = X^c = -Smesch = -50; \quad (14)$$

$$A^c = -\arctg\left(\frac{\tau_x(180 - \alpha)}{\tau_y(180 - \alpha, \text{koorts1}(1, 0,0001, r, C^c)_{1,3})}\right); \quad (18)$$

$$x^o = -Smesch; \quad (19)$$

$$y^o = y + \frac{-y}{X^c - x} \cdot (x^o - x); \quad (20)$$

$$z^o = z + \frac{z - \text{ZZT}}{X^c - x} \cdot (x^o - x); \quad (21)$$

$$r = \sqrt{(z^o)^2 + (y^o)^2}; \quad (22)$$

$$\Omega = \arcsin\left(\frac{y^o}{r}\right). \quad (23)$$

Результат корректировки табл. 8 приведен в табл. 9.

Таблица 9

Результат модификации табл. 8 с целью обеспечения заданной траектории движения ролика

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c	$RuSt$
-44,39227	480,483788	620,457709	0	-89,810873	86,172933
-44,39227	480,483788	620,457709	0	-89,810873	86,172933
-44,765953	480,451482	620,579084	0	-89,811356	86,141321
-50	469,54385	647,401805	0	-89,754229	75,472462
-50	452,370512	675,869847	0	-89,661581	58,643294
-50	445,234979	687,102755	0	-89,64283	51,616714

В табл. 9 последняя строка не нужна и приведена для того, чтобы показать, что $RuSt-2=49,6$ меньше $ROST=55$.

Удалим из табл. 9 повторяющиеся строки (появление повторяющихся строк происходит, когда намотка идет по плоской грани).

В результате получаем табл. 10.

(для четырехкоординатной намотки)

$$z_r = Z^c - Raskl = r; \quad (15)$$

$$C^c = C^c - \Omega; \quad (16)$$

$$B^c = 0; \quad (17)$$

Таблица 10

Координаты исполнительных органов станка на обратном ходу витка

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
-44,765953	480	620,579084	0	-89,811356
-50	469,54385	647,401805	0	-89,754229
-50	452,370512	675,869847	0	-89,661581

Получив строки координат исполнительных органов станка на обратном ходу витка, можно продолжить запись табл. 7.

Заводим ленту между штырями 25 и 26. Для этого перемещаем ролик в начало обратного хода витка, а следующей строкой поворачиваем оправку в начало обратного хода витка так, чтобы угол ее поворота равнялся значению, полученному по формуле (11). Получаем табл. 11.

Таблица 11

Координаты исполнительных органов станка

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762
810	427	497,921157	0	89,65762
810	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	620,579084	0	-89,811356

Объединяем табл. 10 и 11, получаем табл. 12.

Таблица 12

Координаты исполнительных органов станка

X ^c	Z ^c	C ^c	B ^c	A ^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762
810	427	497,921157	0	89,65762
810	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	620,579084	0	-89,811356
-50	469,54385	647,401805	0	-89,754229
-50	452,370512	675,869847	0	-89,661581

В соответствии с табл. 1 нам необходимо завести ленту между штырями 7 и 8, для этого определим положение оправки в соответствии с формулой (8). При этом значение $\chi(\eta)$ определим по формуле

$$\chi(\eta) = \arcsin \left(\frac{y_{cl} - \frac{y_{cl} \cdot x_{cl}}{Smesch + x_{cl}}}{ROST} \right),$$

где x_{cl} , y_{cl} вычисляются по формулам (12), (13).

В результате поворот оправки $\eta=721,959228^\circ$. Вставим это значение в табл. 12. Получим табл. 13.

Таблица 13

Координаты исполнительных органов станка

X ^c	Z ^c	C ^c	B ^c	A ^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762
810	427	497,921157	0	89,65762
810	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	620,579084	0	-89,811356
-50	469,54385	647,401805	0	-89,754229
-50	452,370512	675,869847	0	-89,661581
-50	452,370512	721,959228	0	-89,661581

Заводим ленту между штырями 7 и 8, для этого по координате Z подъезжаем к оправке на минимальное расстояние, например до 37 мм (для справки: радиус описанной окружности ≈ 32 мм). Перепишем табл. 13 в табл. 14.

Таблица 14

Координаты исполнительных органов станка

X ^c	Z ^c	C ^c	B ^c	A ^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762
810	427	497,921157	0	89,65762
810	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	620,579084	0	-89,811356
-50	469,54385	647,401805	0	-89,754229
-50	452,370512	675,869847	0	-89,661581
-50	452,370512	721,959228	0	-89,661581
-50	427	721,959228	0	-89,661581

В соответствии с табл. 1 на начало второго витка мы должны повернуть оправку, чтобы лента прошла между штырями 21 и 22.

Угол поворота оправки η вычисляем по формуле (9). Он будет равен $908,158344^\circ$. Занесем его в табл. 14, одновременно надо развернуть ролик до значения начала прямого хода второго витка, а координату Z^c – до значения

$$ZZT + Raskl = 480.$$

Таблица 15

Координаты исполнительных органов станка

X ^c	Z ^c	C ^c	B ^c	A ^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762
810	427	497,921157	0	89,65762
810	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	620,579084	0	-89,811356
-50	469,54385	647,401805	0	-89,754229
-50	452,370512	675,869847	0	-89,661581
-50	452,370512	721,959228	0	-89,661581
-50	427	721,959228	0	-89,661581
-50	427	811,959228	0	-89,661581
-50	480	908,158344	0	89,65762

Последней строкой табл. 15 должен быть подвод исполнительных органов станка в начальную точку второго витка.

Рассчитывать второй виток авторы в данной статье не предусматривают.

Последнюю строку заполним данными, рассчитанными вне рамок статьи (табл. 16).

Таблица 16

Координаты исполнительных органов станка

X^c	Z^c	C^c	B^c	A^c
810	466,954299	337,055346	0	89,65762
810	466,954299	407,921157	0	89,65762
810	427	407,921157	0	89,65762
810	427	497,921157	0	89,65762
810	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	594,930945	0	-89,164604
-44,765953	480	620,579084	0	-89,811356
-50	469,54385	647,401805	0	-89,754229
-50	452,370512	675,869847	0	-89,661581
-50	452,370512	721,959228	0	-89,661581
-50	427	721,959228	0	-89,661581
-50	427	811,959228	0	-89,661581
-50	480	908,158344	0	89,786625
810	456,458726	976,955721	0	89,786625

Выводы

Итак, мы получили координаты исполнительных органов станка для первого витка. Используя приведенную логику, легко получить для всех 28 витков подобные координаты.

Перевод табл. 16 в коды системы управления станком не представляет сложности.

По данной методике разработана система автопрограммирования «Виток» в среде MathCad.

Программы успешно отработали.

Иллюстрация процесса намотки представлена на рис. 8. Фрагмент намотанной трубы представлен на рис. 9.



Рис. 8. Процесс намотки



Рис. 9. Фрагмент намотанной трубы

Система «Виток» использовалась при разработке программ намотки для трубы 28x28x2 мм по теме «Січ-2М».

Статья поступила 20.03.2019