

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ ВИТКОВ ВИНТОВОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА

*Олег Ляшук<sup>1</sup>, Андрей Дячун<sup>1</sup>, Тетяна Навроцька<sup>1</sup>, Стефания Билук<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя  
 Ул. Русская 56, Тернополь, Украина. E-mail: oleg-lashyk@rambler.ru  
<sup>2</sup>ВПНУБИП «Бережанський агротехнічний інститут»  
 Ул. Академічна, 20, Бережани, Україна. E-mail: oleg-lashyk@rambler.ru

*Oleg Lyashuk<sup>1</sup>, Andrii Djachun<sup>1</sup>, Tatyana Navrocka<sup>1</sup>, Stefania Biluk<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Ternopil Ivan Puluj National Technical University  
 Ruska str., 56, Ternopil, Ukraine. E-mail: oleg-lashyk@rambler.ru  
<sup>2</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
 Berezhanj Agrotechnical Institute

**Аннотация.** На данное время проектирования и расчеты транспортно-технологических механизмов проводится за типичными схемами без учета особенностей и специфики производства, в частности сельскохозяйственного. Поэтому, исходя из необходимости обеспечения проектирования рабочих органов можно представить расчетную схему приспособления для калибровки витка винтовой заготовки на шаг для рабочих органов конвейеров. Выведено аналитические зависимости для определения необходимого крутящего момента на приводе для осуществления калибровки, а также уравнения пластичности по энергетической теории с учетом укрепления, выведено зависимость для определения осевой силы деформации витка. На основе аналитических зависимостей построены графические зависимости изменения величины крутящего момента на приводе при калибровке витков на шаг от ширины, толщины спирали и от угла наклона клина устройства.

**Ключевые слова:** винтовые спирали, технологический процесс, калибровки на шаг, усилия калибровки.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На данное время проектирования и расчеты транспортно-технологических механизмов проводится за типовыми схемами без учета особенностей и специфики производства, в частности сельскохозяйственного.

Современный этап развития транспортно-технологических механизмов непрерывного действия сельскохозяйственного назначения требует поиска новых путей улучшения технологических и эксплуатационных параметров рабочих органов, которые дают возможность повысить производительность и улучшить качество транспортных процессов, операций, производительность труда. Винтовые рабочие органы (ВРО) получили широкое использование во всех отраслях народного хозяйства благодаря концентрации различных операций в сочетании с транспортировкой.

Поэтому основной проблемой при их создании и обоснование параметров новых конструкций, которые обеспечивают расширение технологических

возможностей является разработка обоснования их параметров при разгибе винтовых заготовок (ВЗ), которые навитые в плотные витки.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросам исследования и обоснования параметров ВРО посвящены труды Попова Е.А. [1], Лысов М. И. [2], Зубцова М.Е. [3], Гевка Б.М. [5, 15], Рогатинский Р.М. [8-10], Филиппа М.И. [12], Василькива В.В. [12-14]. Результаты научно-исследовательской работы по обкатыванию роликами на долговечность складных деталей представлено [17-18]. Учитывая большие масштабы использования ВРО и разнообразные задачи, которые им необходимо выполнять вопрос их калибровки и определения силовых и конструктивных параметров актуальны и имеют важное народнохозяйственное значение.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы – теоретическое обоснование технологического процесса калибровки ВРО с определением силовых и конструктивных параметров.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Калибровки витка спирали осуществляют с помощью устройства [5, 8, 19-20]. Спираль 1 из плотно навитыми витками жестко устанавливают в устройство и с помощью клина 2 начинают осуществлять отгиб спирали 3 с одновременным ее навивкой на трубу с использованием силового пневмоцилиндра и рычагов.

Рассмотрим процесс калибровки витка винтовой заготовки на шаг (рис. 1). Из условия равновесия сил и установленного процесса калибровки с учета сил трения на обеих поверхностях клиньях определяем необходимый крутящий момент на приводе для осуществления калибровки:

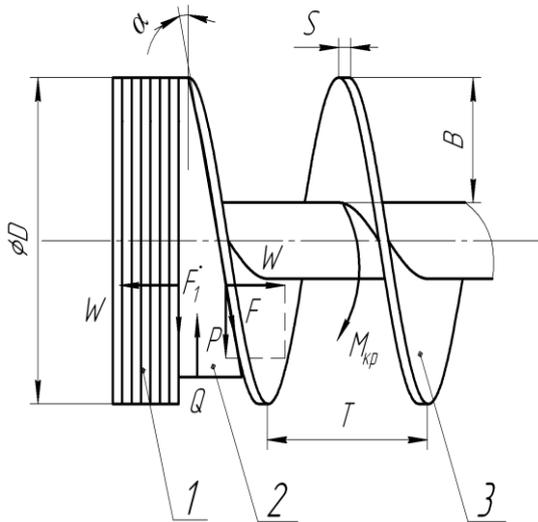
$$M_{кр} = Q \frac{D}{2}, \quad (1)$$

где:  $Q$  – сила подачи клина, Н;  $D$  – наружный диаметр заготовки до калибровки, мм.

Силу подачи клина находим из зависимости:

$$Q = P + F_1, \quad (2)$$

где:  $P$  – радиальная сила на наклонной части клин, Н;  $F_1$  – сила трения на вертикальной части клина, Н.



**Рис. 1.** Расчетная схема приспособления для калибровки витка винтовой заготовки на шаг: 1 – плотно навита заготовка, 2 – клин; 3 – калиброванные витки винтовой заготовки

**Fig. 1.** Design model of adaptations for calibration the screw billet spiral step: 1 – densely wound around billet 2 – wedge; 3 – the turns the calibrated screw billet

Радиальная сила на наклонной части клина:

$$P = W \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi), \quad (3)$$

где:  $\alpha$  – угол наклона клина, град;  $\varphi$  – угол трения на наклонной плоскости клина, град;  $W$  – осевая сила деформации витков, Н.

Сила трения на вертикальной части клина

$$F_1 = W \cdot \operatorname{tg}\varphi_1, \quad (4)$$

где:  $\varphi_1$  – угол трения на вертикальной плоскости клина, град.

Тогда:

$$Q = W[\operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg}\varphi_1]. \quad (5)$$

Осевую силу деформации витков находим по формуле:

$$W = \frac{2M_{32}}{D}, \quad (6)$$

где:  $M_{32}$  – момент сгибания витка, Н.мм.

Процесс разгибания витка можно рассматривать как изгиб широкой ленты. Напряженно-деформированное состояние в этих местах представлено как объемное состояние напряжений и плоский состояние деформаций. Согласно рис. 1, учитывая постоянство внутреннего радиуса изгиба ленты по всей ширине винтовой заготовки, используем полярную систему координат с полюсом, что совпадает с центром радиуса в данный момент деформирования. Уравнение равновесия примет вид [1]:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0, \quad (7)$$

где:  $\sigma_\rho$  – радиальные напряжения, МПа;  $\sigma_\theta$  – тангенциальные напряжения, МПа.

Уравнения пластичности в упрощенном виде по энергетической теории при условии, что  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  являются крайними главными напряжениями с учетом укрепления, будет [2, 12, 17-18] (определение для зоны сжатия и зоны растяжения).

Для зоны сжатия:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = -\beta \cdot \left( \sigma_{T.O} - \Pi \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right). \quad (8)$$

Для зоны растяжения:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \beta \cdot \left( \sigma_{T.O} - \Pi \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right), \quad (9)$$

где:  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияние среднего главного напряжения  $\sigma_z$ ;  $\sigma_{T.O}$  – экстраполированный предел текучести, МПа;  $\Pi$  – линейный модуль укрепления, МПа;  $\rho_n$  – радиус нейтральной поверхности деформации, мм.

Так как при изгибе широкой ленты аксиальные деформации  $\varepsilon_z$  равны нулю, что соответствует условию плоского состояния деформации, коэффициент  $\beta$  будет равен 1,15. Радиус нейтральной поверхности деформации определяется уравнением [5, 7, 16]:

$$\rho_n = \sqrt{R_1 \cdot r_1}, \quad (10)$$

где:  $R_1$  – внешний радиус гибки ленты по линии сгиба, мм.

После решения системы уравнений (8), (9), (10) с использованием граничных условий, при которых для зоны растяжения  $\sigma_\rho = 0$  при  $\rho = R_1$ , а для зоны сжатия  $\sigma_\rho = 0$  при  $\rho = r_1$ , находим формулы, характеризующие распределение напряжений  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  с учетом укрепления материала [1, 2].

Для зоны растяжения:

$$\sigma_\rho = -\beta \cdot \left( \sigma_{T.O} - \frac{\Pi}{2} \ln \frac{\rho \cdot R_1}{\rho_n^2} \right) \cdot \ln \frac{R_1}{\rho}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta \text{роз}} = & \beta \cdot \sigma_{T.O} \left( 1 - \ln \frac{R_1}{\rho} \right) + \\ & + \beta \cdot \frac{\Pi}{2} \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} - \ln \frac{R_1 \cdot \rho}{\rho_n^2} \cdot \ln \frac{R_1}{\rho} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Для зоны сжатия:

$$\sigma_\rho = -\beta \cdot \left( \sigma_{T.O} + \frac{\Pi}{2} \ln \frac{\rho_n^2}{\rho \cdot r_1} \right) \cdot \ln \frac{\rho}{R_1}; \quad (13)$$

$$\sigma_{\theta \text{сж}} = -\beta \cdot \left( \sigma_{T.O} \cdot \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r_1} \right) + \frac{\Pi}{2} \left( \ln \frac{\rho_n}{\rho} + \ln \frac{\rho_n^2}{\rho \cdot r_1} \cdot \ln \frac{\rho}{R_1} \right) \right). \quad (14)$$

Выведена аналитическая зависимость для определения момента разгибания витка  $M_{3z}$  с учетом укрепления можно определить как интегральную сумму моментов созданных тангенциальными напряжениями  $\sigma_\theta$ :

$$M_{3z} = \int_{\rho_n}^{R_1} \sigma_{\theta_{розм}} \cdot \rho d\rho + \int_{r_1}^{\rho_n} \sigma_{\theta_{зм}} \cdot \rho d\rho. \quad (15)$$

Подставляя значения формул (12), (14) в формулу (15) получим [1, 9]:

$$M_{3z} = \beta \cdot B \cdot \left[ \sigma_{T.O} \cdot \frac{S^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right] \quad (16)$$

где:  $B$  – ширина витка, мм;  $S$  – толщина витка, мм.

Радиус кривизны разогнутого витка определили, учитывая предыдущие исследования [4, 11, 13]:

$$\rho_0 = \frac{T}{\frac{4k^2(1+n)}{n} \cos^2 \varphi_0 \cos \delta - 4k(\cos \varphi_0)^{\frac{2}{1+n}} \left[ \frac{\sqrt{2}}{4} B(p', q') - \Psi_2(k, \varphi_0) \right] \sin \delta} \quad (17)$$

где:  $T$  – шаг витков, мм;  $k, \varphi_0$  – эллиптические параметры;  $n$  – константа аппроксимирующей кривой упрочнения материала винтовой заготовки;  $\delta$  – угол действия силы разгибания, град;  $B(p', q')$  – Гамма-функция;  $\Psi_2(k, \varphi_0)$  – функция эллиптического интеграла.

При этом внешний и внутренний радиусы изгиба определяются по формулам:

$$R_1 = \rho_0 + \frac{S}{2}, \quad (18)$$

$$r_1 = \rho_0 - \frac{S}{2}. \quad (19)$$

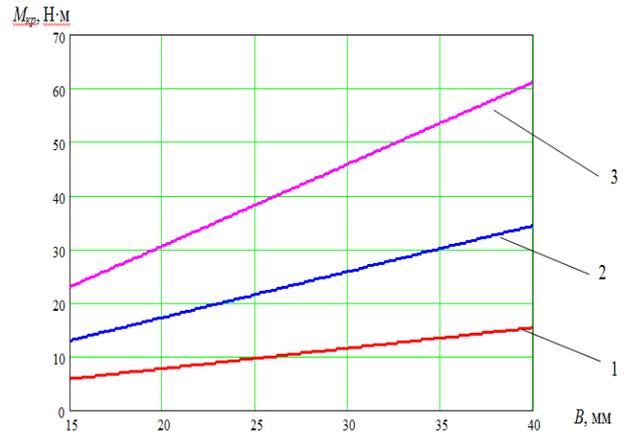
Выведена аналитическая зависимость для определения осевой силы деформации витков, учитывая формулы (6), (16) находим по формуле:

$$W = \frac{2\beta \cdot B \cdot \left[ \sigma_{T.O} \cdot \frac{S^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right]}{D} \quad (20)$$

А также определить необходимый крутящий момент на приводе для осуществления калибровки винтовой заготовки на шаг, учитывая формулы (1), (5), (20):

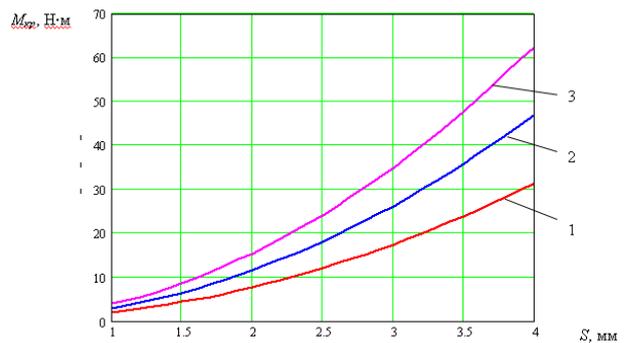
$$M_{\text{пр}} = \beta \cdot B \cdot \left[ \sigma_{T.O} \cdot \frac{S^2}{4} + \Pi \cdot \left( \frac{R_1^2 + r_1^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{r_1}} - \frac{R_1^2 - r_1^2}{8} \right) \right] \times [tg(\alpha + \varphi) + tg\varphi_1] \quad (21)$$

На основе формулы (21) построены графические зависимости крутящего момента на приводе для осуществления калибровки винтовой заготовки на шаг от ширины, толщины витка и угла наклона клина для стали 08кп (рис. 2-4).



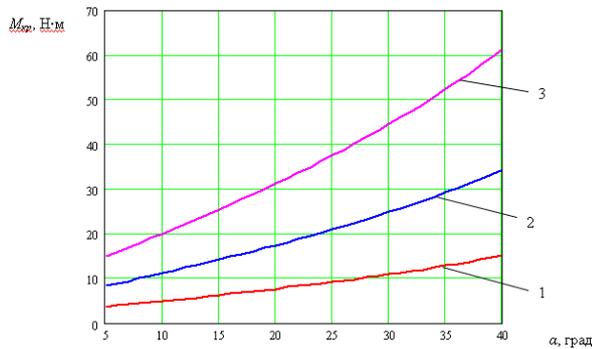
**Рис. 2.** Графики зависимости крутящего момента на приводе для осуществления калибровки винтовой заготовки на шаг от ширины витка (сталь 08кп)  $\alpha = 20$  град: 1 –  $S = 2$  мм; 2 –  $S = 3$  мм; 3 –  $S = 4$  мм

**Fig. 2.** The graphs of torque on a drive to implement the screw billet calibration a step by spiral widths (steel 08kp)  $\alpha = 20$  deg: 1 –  $S = 2$  mm; 2 –  $S = 3$  mm; 3 –  $S = 4$  mm



**Рис. 3.** Графики зависимости крутящего момента на приводе для осуществления калибровки винтовой заготовки на шаг от толщины витка (сталь 08кп)  $\alpha = 20$  град: 1 –  $B = 20$  мм; 2 –  $B = 30$  мм; 3 –  $B = 40$  мм

**Fig. 3.** The graphs of torque on a drive to implement the screw billet calibration a step by spiral the thickness of (steel 08kp)  $\alpha = 20$  deg: 1 –  $B = 20$  mm; 2 –  $B = 30$  mm; 3 –  $B = 40$  mm



**Рис. 4.** Графики зависимости крутящего момента на приводе для осуществления калибровки винтовой заготовки на шаг от угла наклона клина (сталь 08кп)  $\alpha = 20$  град: 1 –  $S = 2$  мм; 2 –  $S = 3$  мм; 3 –  $S = 4$  мм

**Fig. 4.** The graphs of torque on a drive to implement the calibration screw on the billet step on the angle of the wedge (steel 08kp)  $\alpha = 20$  deg: 1 –  $S = 2$  mm; 2 –  $S = 3$  mm; 3 –  $S = 4$  mm

Из графиков видно, что увеличение ширины витка, толщины витка и угла наклона клина приводит к росту крутящего момента на приводе для осуществления калибровки винтовой заготовки на шаг.

#### ВЫВОДЫ

1. Выведенные аналитические зависимости для определения необходимого крутящего момента на приводе для осуществления калибровки, а также уравнения пластичности по энергетической теории с учетом укрепления, выведено зависимость для определения осевой силы деформации витка.

2. На основе аналитических зависимостей построены графические зависимости изменения величины крутящего момента на приводе при калибровке витков на шаг от ширины, толщины спирали и от угла наклона клина устройства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Попов Е.А. 1980.** Основы теории листовой штамповки – М.: Машиностроение, 348.
2. **Лысов М.И. 1966.** Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки – М.: Машиностроение, 236.
3. **Зубцов М.Е. 1980.** Листовая штамповка. – Л.: Машиностроение, 432.
4. **Шевченко К.Н. 1970.** Основы математических методов в теории обработки металлов давлением. – М.: Высша школа, 351.
5. **Гевко Б.М. 1986.** Технология изготовления спиралей шнеков. Львов: – “Свит”, 125. (Украина).
6. **Аверкиев Ю.А. 1981.** Характер формоизменения и силовые условия при гибке полосы на ребро. – Вести. Машиностроение, – №1. 64-68.
7. **Романовський В.П. 1979.** Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 520.

8. **Гевко И.Б. 2013.** Научно-прикладные основы создания винтовых транспортно-технологических механизмов: Автореф. дис. на получение наук. степени доктора техн. наук: спец. 05.02.02 «Машиноведение» – Львов, 42. (Украина).
9. **Gevko R.B. 2011.** Obgruntuvannya parametriv konstruktsiyi robochoho organu shaybovogo transportera. Visnik Kharkivskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu Imeni Petra Vasilenka. – Vipusk 114. 241-246. (Украина)
10. **Рогатинский Р., Гевко И. 2012.** Модель конструирования и выбора винтовых конвейеров с расширенными технологическими возможностями. – Вестник ТНТУ. – № 3 (67). 197-210. (Украина).
11. **Zenkov R.L. 1980.** Mashiny nepreryvnogo transporta. – М.: Mashinostroenie, 367.
12. **Пилипец М.И., Васильков В.В. 2014.** Обобщенный технологический процесс изготовления винтовых и шнековых заготовок Вестник инженерной академии Украины. – Вып. 1. 192–200. (Украина).
13. **Гевко Б.М., Пилипец М.И., Васильков В.В., Радик Д.Л. 2009.** Технологические основы формообразования разнопрофильных винтовых заготовок. – Тернополь: Изд-во ТГТУ. И. Пулюя, 457. (Украина).
14. **Васильков В.В. 2014.** Методика выбора эффективных технологических процессов изготовления винтовых и шнековых заготовок Обработка материалов давлением. – Вып. 1 (38). 97–102. (Украина).
15. **Гевко Б.М., Ляшук А.Л., Гевко И. Б. 2008.** Технологические основы формообразования специализированных профильных винтовых деталей - Тернополь: ТГТУ имени Ивана Пулюя, 367. (Украина).
16. **Гевко И. Б., Левенец В.Б. 2008.** Технологические особенности формирования винтовых деталей. Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: материалы международной научно-технической конференции. – Севастополь. 59-61. (Украина).
17. **Бутаков Б.И., Марченко Д.Д. 2008.** Разработка способа обкатывания роликами стальных деталей с целью повышения их контактной прочности // MOTROL. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch of Lublin Ropczyce School of Engineering and Management. – Lublin. – Vol. 10. 15 – 28.
18. **Aleksey Popov 2010.** Новая теория контактной прочности упруго сжатых тел //MOTROL. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch of Lublin Ropczyce School of Engineering and Management. – Lublin, – Tom 12A. 223 – 232.

19. Патент 22581 UA, МПК В21D 11/06. Устройство для изготовления и калибровки спиралей шнеков [Текст] / Васильков Василий Васильевич, Левенец Владимир Богданович, Пилипец Михаил Илькович, Радик Дмитрий Леонидович - опубл. 25.04.2007. (Украина)
20. Патент 44545 UA, МПК В21D 11/06. Способ калибровки винтовой заготовки на шаг [Текст] / Васильков Василий Васильевич, Радик Дмитрий Леонидович – опубл. 12.10.2009. (Украина).

THE STUDY OF POWER PARAMETERS OF  
CALIBRATING THE TURNS OF A SCREW  
WORKING BODY

**Summary.** At this time, the design and computations of transport-technological mechanisms are carried

out using the typical schemes without considering the peculiarities and specifics of production, particularly agricultural. Therefore, based on the need for designing the working bodies, the analytical model of a device for calibrating the screw work piece turn at a pitch for the working bodies of the conveyors is proposed. The analytical dependences for determining the required torque on the drive for calibration are developed, as well as the plasticity equations using the theory of energy taking into account the strengthening. The dependence to determine the axial power of screw deformation is developed. Based on the analytical dependences, the graph dependences of variations in torque on the drive while calibrating the turns at a pitch of the width and thickness of the spiral, and of the inclination angle of the wedge device are drawn.

**Key words:** helical spiral, technological process, calibration on a step, calibration effort.