

УДК 621.7

*В.Н. Трофимов¹, М.Г. Штуца², Д.С. Анищук²,
А.В. Есеев², Т.В. Кузнецова¹*

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

²ОАО «Чепецкий механический завод»

ПРОФИЛИРОВАНИЕ КАНАЛА БИКОНИЧЕСКИХ ВОЛОК

Аннотация. При проектировании процесса многократного волочения длинномерных осесимметричных сплошных и композиционных изделий на этапе грубого волочения целесообразно применение биконических волок, в которых входной конус обеспечивает малое обжатие и улучшенные условия смазки по сравнению со стандартными волоками, а основное обжатие происходит во втором конусе рабочей части канала волокна. Получены соотношения для расчета напряжения волочения осесимметричных заготовок и оптимальной геометрии канала биконических волок. Показано, что биконические волокна за счет улучшения условий трения позволяют снизить напряжение волочения и, соответственно, обеспечить наилучшие энергосиловые параметры процесса грубого волочения, снизить обрывность и дефектность заготовки, что особенно важно при волочении композиционных изделий.

Ключевые слова: напряжение волочения, биконическая волока, оптимальный угол, коэффициент трения, осесимметричные композиционные изделия.

PROFILING CHANNEL DRAWING TOOLS WITH THE CHANNEL OF TWO CONES

Abstract. In the design process multiple drawing a long axially symmetric continuous and composite products at the stage of rough drawing it is advisable to use drawing tools with the channel of two cones, in which input cone ensures a low compression and improved conditions of friction compared with standard drawing tools, and the compression occurs in the second cone of the working part of the channel drawing tool. The formulas for calculating the pressure of drawing axisymmetric drawing products and optimum geometry of the channel drawing tool with the channel of the two cones. It is shown that the drawing tool with the channel of the two cones at the expense of improvement of conditions of friction can reduce pressure of drawing and, accordingly, to provide the best power parameters of the process of drawing, reduce the filament and the defectiveness of a work piece, which is specially important in the process of drawing composite products.

Keywords: pressure of drawing, the drawing tool with the channel of the two cones, the optimal angle, the coefficient of friction, axially symmetric composite products.

Одним из способов изготовления длинномерных изделий из цветных металлов и сплавов является процесс холодного многопроходного волочения. Заготовки для таких изделий получают прокаткой предварительно пресованной заготовки или слитка диам. 60 – 70 мм до диам. 10 – 20 мм с последующим волочением до заданного диаметра.

Однако в некоторых случаях, например при изготовлении слоистых композиционных изделий, представляющих сердечник и нанесенные на него одну или две оболочки, использование прокатки, как предварительной операции ограничено, так как различие в механических свойствах компонентов в условиях больших обжатий ведет к росту сил межслойного трения и отслоению оболочки от сердечника, а также к разрушению одного из компонентов. Если сердечник также является композитом, например, однонаправленным волокнистым композитом, то возможно разрушение как матрицы, так и волокон композита. В этом случае, несмотря на существенное усложнение процесса, предварительные операции также выполняют по схеме волочения на линейных станах с использованием монолитных волок.

Проектируемый маршрут волочения должен удовлетворять следующим требованиям:

– иметь минимальное число переходов, т. е. максимально возможные вытяжки λ на отдельных переходах, так как повышение дробности процесса деформации ведет к интенсификации процессов упрочнения, росту неоднородности механических характеристик композита по сечению, что, в свою очередь ведет к необходимости частых отжигов для предотвращения разрушения одного из компонентов композита. Кроме того, при отжиге на поверхностях контакта разных металлов, составляющих композит, образуются переходные слои интерметаллидов, которые могут отрицательно влиять на пластические свойства компонентов композита и также способствуют их разрушению;

– принимаемые при проектировании значения вытяжки λ должны обеспечивать достаточный коэффициент запаса γ [1].

Авторы работы [1] одними из основных причин разрушения заготовок при волочении называют несовершенство продольного профиля волочильного канала, повышенные силы контактного трения и высокие степени деформации.

Для волочения заготовок больших диаметров используют стандартные волокна [2], имеющие угол конуса канала в рабочей зоне $2\alpha_v = 18^\circ$. Теоретический анализ известных формул для определения напряжения

волочения подтверждает указанные выводы и показывает, что при стандартных значениях α_b максимальные значения вытяжки λ могут быть обеспечены за счет оптимизации геометрии канала волок при одновременном снижении коэффициента трения f_n путем улучшения условий захвата смазки. С этой целью предложено уменьшить угол α_b со стандартных значений до $2 \div 3^\circ$ [1]. Однако такие значения α_b , не являясь оптимальными, ведут к значительному росту осевых размеров волок.

Оценим размеры стандартных волоки и волок с уменьшенными значениями α_b для волочения заготовок большого диаметра.

Длина участков канала конической волоки определяется [1]:

– рабочая зона канала $L_p = aD_1(\sqrt{\lambda} - 1)/(2\text{tg}\alpha_b)$ или $L_p = aD_0(1 - 1/\sqrt{\lambda})/(2\text{tg}\alpha_b)$, где $a = 1,05 \div 1,3$ – коэффициент, учитывающий несоосность канала волоки и заготовки; D_0 и D_1 – диаметр заготовки до и после волочения; λ – вытяжка;

– входная часть канала $L_0 = k_0 L_p$, где $k_0 = 1,0 \div 1,5$;

– калибрующая часть канала $L_k = k_k D_1$, где $k_k = 0,3 \div 1,0$.

Суммарная длина канала волоки L определяется формулой

$$L = D_1 [a(\sqrt{\lambda} - 1)(1 + k_0)/(2\text{tg}\alpha_b) + k_k].$$

Расчетные значения L для разных диаметров при минимальных значениях коэффициентов, входящих в формулу (1), приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при $2\alpha_b = 18^\circ$ расчетные значения L для стандартных волок близки к рекомендуемым стандартам [2], однако такие значения α_b не всегда обеспечивают минимальные значения деформирующего усилия и удовлетворительные условия подвода смазки.

Уменьшение α_b ведет к существенному увеличению размеров волок, которые неприемлемы как с точки зрения расхода материала, так и неудобства их механической и термической обработки, транспортировки

и монтажа на волочильном стане. В настоящее время наиболее распространены волоки с коническим и радиальным выпуклым каналом, что обусловлено удобством его обработки, особенно для малых диаметров. Однако для волок больших диаметров современные технологии позволяют изготавливать волоки с более сложной геометрией, например волоки с биконическим вогнутым каналом. Эксплуатация таких волок может быть целесообразна при волочении композиционных заготовок больших диаметров, когда объемы производства небольшие, а повышенная стоимость их изготовления окупается высокой стоимостью готовой продукции.

Рассмотрим волоку с биконическим вогнутым каналом (см. рисунок), в котором при волочении заготовки суммарная вытяжка определяется:

$$\lambda = (D_0/D_1)^2 = \lambda_1 \lambda_2,$$

где λ_1 – вытяжка во входной части L_1 рабочей зоны L_p ; λ_2 – вытяжка в основной части L_2 рабочей зоны. Угол α_1 зоны L_1 выбирается равным $2 \div 4^\circ$ для улучшения условий смазки и обеспечения смешанного режима трения с $f_n = 0,02 \div 0,03$. Отношение углов α_1 и α_2 необходимо выбирать таким, чтобы обеспечить минимальное напряжение волочения.

Для расчета оптимальных геометрических параметров рабочей зоны канала биконической волоки (без учета влияния калибрующей зоны) определим напряжение волочения, используя принцип аддитивного сложения:

$$\sigma_{\text{вол}} = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_4 + \Delta\sigma_5 + \sigma_q, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_1$ – приращение напряжения волочения за счет сдвига на границе Γ_1 ; $\Delta\sigma_2$ – приращение напряжения волочения в области Ω_1 ; $\Delta\sigma_3$ – приращение напряжения волочения за счет сдвига на границе Γ_2 ; $\Delta\sigma_4$ – приращение напряжения волочения в области Ω_2 ; $\Delta\sigma_5$ – приращение напряжения волочения за счет сдвига на границе Γ_3 ; σ_q – напряжение противонапряжения.

Таблица 1

Расчетные значения длины канала волок ($a = 1,05$; $k_0 = 1,0$; $k_k = 0,3$)*

D_1 , мм	L_p , мм	L_0 , мм	L_k , мм	L , мм	L/D_1
$2\alpha_b = 4^\circ$					
70	76,2/124,2	76,2/124,2	21/21	173,4/269,4	2,48/3,89
50	54,4/88,7	54,4/88,7	15/15	123,8/192,4	
30	32,6/53,2	32,6/53,2	9/9	74,2/115,4	
$2\alpha_b = 18^\circ$					
70	16,8/27,4	16,8/27,4	21/21	54,6/75,8	0,78/1,08
50	12,0/19,6	12,0/19,6	15,0/15,0	39,0/54,2	
30	7,2/11,7	7,2/11,7	9/9	23,4/32,4	

* Числитель – $\lambda = 1,15$, знаменатель – $\lambda = 1,25$.

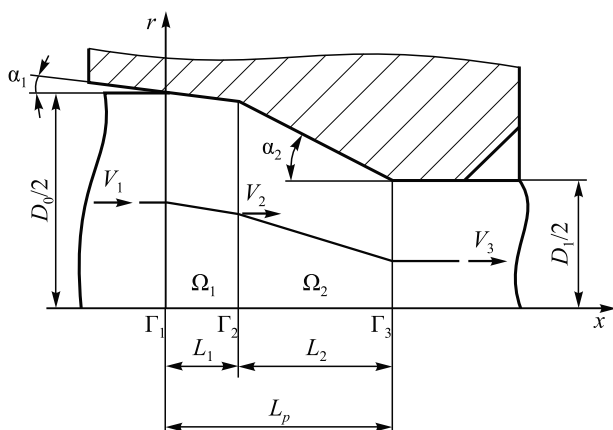


Схема канала биконической волоки

Используем допущения и подходы, принятые в работе [5]:

- материал заготовки идеальный жесткопластический;
- продольные σ_x и радиальные σ_r напряжения распределены равномерно по сечению заготовки;
- выполняется приближенное условие пластичности $\sigma_x + \sigma_r = \sigma_s$, где σ_s – сопротивление деформации. Для композиционных заготовок величина σ_s определяется путем усреднения по сечению [1];
- для нормальных напряжений на поверхности контакта выполняется приближенное равенство $\sigma_n \approx \sigma_r$;
- на поверхности контакта выполняется закон трения Кулона-Амонтона $\tau_k = f_n \sigma_n$.

Используя метод баланса мощностей, определим приращение напряжения волочения на границах $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$, являющихся поверхностями разрыва скоростей [3]:

$$\Delta\sigma_i V_i \Gamma_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \int_{\Gamma_i} |\Delta V_{II}^i| d\Gamma, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где V_i и $|\Delta V_{II}^i|$ – нормальная составляющая скорости и разрыв составляющей скорости параллельной i -ой границе, соответственно; Γ_i – площадь сечения заготовки на i -ой границе.

Для границ Γ_1, Γ_2 и Γ_3 имеем:

$$\Delta V_{II}^1 = V_1 \operatorname{tg} \alpha_1; \quad \Delta V_{II}^2 = V_2 (\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1); \quad \Delta V_{II}^3 = V_3 \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (3)$$

Используя условие постоянства расхода $V_1 D_0^2 = V_i D_i^2$, из уравнений (2) и (3) получим

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= 0,385 \operatorname{tg} \alpha_1; \quad \Delta\sigma_3 = 0,385 (\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1); \\ \Delta\sigma_2 &= 0,385 \operatorname{tg} \alpha_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Приращения $\Delta\sigma_2$ и $\Delta\sigma_4$ определим по упрощенной формуле Перлина И.Л. [1], принимая $\sigma_2 = 0$:

$$\Delta\sigma_2 = \ln \lambda_1 \left(1 + \frac{f_n}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right); \quad \Delta\sigma_4 = \ln \lambda_2 \left(1 + \frac{f_n}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right). \quad (5)$$

Введем величины коэффициента относительной вытяжки k_λ и относительный угловой коэффициент k_α :

$$k_\lambda = \lambda_2 / \lambda_1 (k_\lambda > 1); \quad k_\alpha = \operatorname{tg} \alpha_2 / \operatorname{tg} \alpha_1 (\alpha_2 > \alpha_1 \text{ и } k_\alpha > 1). \quad (6)$$

Из соотношений (1) и (4) – (6) после преобразований получим

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\text{вол}} = \frac{\sigma_{\text{вол}}}{\sigma_s} &= \ln \lambda + \frac{f_n}{k_\alpha \operatorname{tg} \alpha_1} \ln (\lambda_1^{1+k_\alpha} k_\lambda) + \\ &+ 0,77 k_\alpha \operatorname{tg} \alpha_1 + \sigma_g. \end{aligned} \quad (7)$$

Определим коэффициент k_α , обеспечивающий минимальное значение напряжения волочения из условия

$$\frac{d\bar{\sigma}_{\text{вол}}}{dk_\alpha} = -\frac{f_n}{k_\alpha^2 \operatorname{tg} \alpha_1} \ln (\lambda_1^{1+k_\alpha} k_\lambda) + 0,77 \operatorname{tg} \alpha_1 = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) имеет вид

$$k_\alpha = 1,14 \frac{\sqrt{f_n (\ln k_\lambda \lambda_1)}}{\operatorname{tg} \alpha_1}. \quad (9)$$

В работе [4] на основе упрощенной модели микрошероховатости и схематизации опорной кривой профиля поверхности предложено соотношение для определения коэффициента трения в режиме смешанного трения

$$f_n = f_{n0} \left(1 - \frac{h}{R_z} \right), \quad (10)$$

где f_{n0} – коэффициент трения при волочении в граничном режиме трения; R_z – высота микронеровностей; h – толщина слоя смазки на входе в зону пластической деформации, обеспечиваемая за счет гидродинамического эффекта смазочного клина.

Для изотермического течения жидкой смазки величина h определяется по формуле [5]

$$h = \frac{3\alpha\mu_0 V_1}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad (11)$$

где α – пьезокоэффициент вязкости смазки; μ_0 – динамический коэффициент вязкости; V_1 – скорость движения заготовки на входе в канал волоки.

При заданном значении α_1 коэффициент трения равен

$$f_n = f_{n0} \left(1 - \frac{3\alpha\mu_0 V_1}{\operatorname{tg} \alpha_1 R_z} \right). \quad (12)$$

Из выражения (12) может быть определен угол α_1 , обеспечивающий заданный коэффициент трения

$$\alpha_1 = \arctg \left[\frac{3\alpha\mu_0 V_1}{R_z (1 - f_n / f_{n0})} \right]. \quad (13)$$

Сравнение параметров одноконусных и биконической волок ($a = 1,05; k_0 = 0; k_k = 0,3$)

D_1 , мм	α_1 , град	α_2 , град	f_n	L_p , мм	L , мм	L/D_1	$\bar{\sigma}_{\text{вол}}$	$\gamma \approx 1/\bar{\sigma}_{\text{вол}}$
Одноконусная волока								
63,9	2	2	0,031	91,7	110,9	1,74	0,371	2,70
Стандартная волока								
63,9	9	9	0,046	20,2	39,4	0,62	0,357	2,80
Биконическая волока								
63,9	2	4,2	0,031	57,0	76,1	1,19	0,282	3,55

Из уравнения (9) с учетом выражений (10) и (11) получим

$$\alpha_2 = \arctg \left[1,14 \sqrt{f_{n0} \ln(k_\lambda \lambda_1) \left(1 - \frac{3\alpha\mu_0 V_0}{\text{tg}\alpha_1 R_z} \right)} \right]. \quad (14)$$

Приведем пример расчета геометрии канала биконической волоки при волочении композиционной заготовки с медной оболочкой диаметром $D_0 = 70$ мм со скоростью $V_0 = 0,3$ м/с и вытяжкой $\lambda = 1,2$.

Принимаем $\alpha_1 = 2^\circ, \lambda_1 = 1,05, R_z = 1$ мкм.

Выбираем материал волоки – твердый сплав. Для пары трения медь-твердый сплав коэффициент трения $f_{n0} = 0,05$ [1].

В качестве смазки выбираем касторовое масло. По данным работы [5] для касторового масла $\alpha = (1,413 + 0,3191 \lg \mu_0) \cdot 10^{-8}$ Па⁻¹, $\mu_0 = 1,043$ Па·с при температуре 20 °С.

Результаты расчета геометрических параметров канала волоки и относительного напряжения волочения приведены в табл. 2, где для сравнения приведены результаты расчета осевых размеров одноконусной волоки с углом $\alpha_b = 2^\circ$, обеспечивающим такие же условия смазки, как и биконическая волока.

Из табл. 2 следует, что по величине осевых размеров биконическая волока занимает среднее значение между одноконусной и стандартной волокой, но за счет сни-

жения коэффициента трения и оптимальной геометрии позволяет снизить напряжение волочения и соответствующее значение коэффициента запаса γ на 20 %.

Выводы. Предложена методика расчета основных размеров канала биконической волоки. Получены соотношения для расчета напряжения волочения и геометрии канала биконических волок. Теоретически показано, что применение таких волок позволяет существенно снизить напряжение волочения по сравнению с одноконусными волоками, что особенно важно при волочении композиционных заготовок. Однако для эффективной эксплуатации таких волок необходимо использование вязких смазок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. –М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
2. ГОСТ 9453-75. Волоки-заготовки из твердых спеченных сплавов для волочения проволоки и прутков круглого сечения.
3. Трофимов В.Н., Кузнецова Т.В., Мельникова Т.Е. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 7. С. 42 – 45.
4. Трофимов В.Н. Совершенствование технологии волочения длинномерных осесимметричных композиционных электропроводников: Дис. ... докт. техн. наук. – Глазов, 2007. – 292 с.
5. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки. –М.: Металлургия, 1986. – 168 с.

© 2013 г. В.Н. Трофимов, М.Г. Штуца, Д.С. Анищук, А.В. Есенева, Т.В. Кузнецова
Поступила 17 мая 2013 г.