

УДК 621.778.073

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАПОРНОЙ ВОЛОКИ ДЛЯ МОКРОГО ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

С. И. ПРАЧ, Ю. Л. БОБАРИКИН

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Напорные волокна используются как инструмент в волоочильном производстве проволоки и прутков. Напорные волокна обеспечивают принудительную подачу смазки в зону деформации волокна и снижение трения и усилия деформации при протягивании проволоки через эту волоку. В результате эффективность волочения повышается за счет снижения энергопотребления и износа волокна.

Напорные волокна получили распространение в процессах сухого волочения, где используются сухие порошкообразные смазки [1]. Принцип работы напорной волокна состоит в нагнетании смазки в зону деформации в результате избыточного давления смазки в напорной зоне перед волокой. Напорная зона представляет собой узкий канал между проволокой и напорной вставкой. Избыточное давление создается за счет увлечения смазки проволокой в зону деформации. Геометрия узкого канала волокна и степень вязкости смазки определяют величину избыточного давления.

В качестве напорного элемента применяют напорную трубку, внутри которой движется проволока. Геометрия узкого канала определяется зазором между трубкой и проволокой и длиной этой трубки.

Для расширения области применения напорных волокон было предложено их использование для мокрого волочения, где применяют не сухие, а жидкие смазки. Сдерживающим фактором использования этих волокон является низкая вязкость жидкостей.

В данной работе проведен анализ возможности использования напорных волокон в мокром волочении. Проведены исследования по увеличению качества получаемой проволоки, вследствие которого разработана конструкция инструмента для волочения проволоки с использованием жидких смазок.

Анализ возможности использования напорных волокон в мокром волочении

В исследовании [2] рассматривается процесс волочения в режиме гидростатического трения, где представлено влияние размера зазора между проволокой и волокой, длины напорных трубок и скорости волочения на развиваемое давление.

Для волочения в режиме гидродинамического трения применяются напорные трубки-насадки (рис. 1). Смазка увлекается движущимся изделием в зазор между поверхностью изделия и насадки, нагнетается в зону деформации, и, при определенном давлении смазки, трущиеся поверхности в зоне деформации разделяются. Для получения высоких давлений применяемые величины зазоров незначительны, поэтому можно считать течение плоским.

При расчете инструмента для волочения в режиме гидродинамического трения необходимо учитывать нагнетающую способность напорной трубки (рис. 1). Выде-

лив в слое смазки некоторый элементарный объем (рис. 2), уравнение равновесия этого элемента запишется в виде:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{d\tau}{dz}.$$

Для малого зазора $p = p(x)$, тогда касательное напряжение:

$$\tau = -\frac{dp}{dx}z + C_3. \quad (1)$$

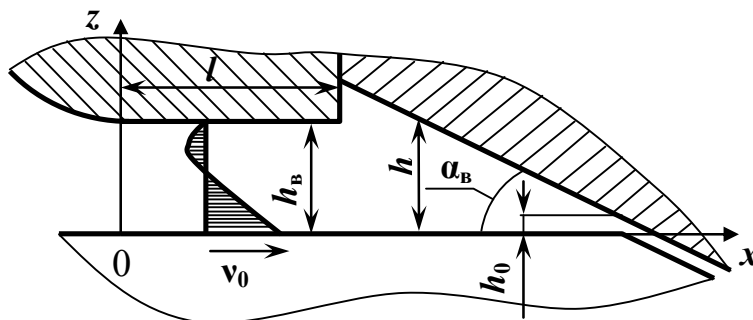


Рис. 1. Схема расчета течения смазки в напорной трубке:

l – длина напорной трубки; h_b – зазор между проволокой и напорной трубкой; h_0 – зазор между проволокой и поверхностью деформирующей волоки в начале зоны деформации; v_0 – скорость волочения; α_b – угол деформирующей волоки

На эпюре скоростей (по высоте) (рис. 2) можно различить две зоны, разграниченные жестким недеформируемым слоем. Наличие последнего характерно для вязкопластического материала. В этой области касательные напряжения ниже предела текучести на сдвиг A , материал не деформируется, перемещаясь как твердый слой. В нашем случае этот слой ограничен значениями $h_1 > z > h_2$.

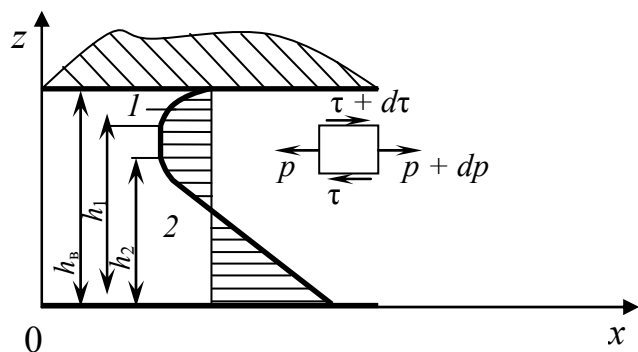


Рис. 2. Эпюра скорости течения вязкопластической смазки:
 τ – касательные напряжения; p – развиваемое давление

В зоне I при $z = h_1$, $\tau = A$ получим:

$$\tau = A + \frac{dp}{dx}(h_1 - z). \quad (2)$$

Для зоны 2:

$$\tau = -A + \frac{dp}{dx(h_2 - z)}.$$

В насадке течение ламинарное и смазка претерпевает только однородную деформацию сдвига, поэтому скорость деформации сдвига равна по модулю интенсивности скоростей деформации сдвига. Учитывая это положение, связь между касательными напряжениями и скоростью сдвига запишется для первой и второй зон:

$$\tau = A + B \frac{dv_x}{dz}, \quad \tau = -A + B \frac{dv_x}{dz}. \quad (3)$$

По результатам интегрирования первого дифференциального уравнения (3) было получено выражение для распределения скоростей в смазочном слое v_x :

$$v_x = -\frac{1}{2B} \frac{dp}{dx} (h - z)(2h_1 - (h + z)), \quad (4)$$

где $h = h_b - x \operatorname{tg} \alpha_b$ – переменный зазор между проволокой и деформирующей волокой.

При выводе формулы (4) приняты следующие граничные условия:

$$v_x|_{z=h} = 0; \quad v_x = v_0 + \frac{1}{2B} \frac{dp}{dx} z(2h_2 - z); \quad v_x|_{z=0} = v_0. \quad (5)$$

Принимается относительный расход смазки:

$$q = \frac{h_0}{2(h_b - x \operatorname{tg} \alpha_b)}. \quad (6)$$

Величина зазора меняется от h_b до h_0 , при этом $q_{\min} = h_0 / 2h_b$, а $q_{\max} = 0,5$. Согласно теории течения вязких смазок при $q = 0,5 dp/dx = 0$. Таким образом, для переменного зазора рабочего конуса волоки имеем с учетом $\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu v_0(1-2q)}{h^2}$ и (6):

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu e^{\alpha p_n} v_0 ((h_b - x \operatorname{tg} \alpha_b) - h_0)}{(h_b - x \operatorname{tg} \alpha_b)^3}.$$

Разделив переменные и интегрируя данное дифференциальное уравнение, после определения постоянной интегрирования из условия $p|_{x=0} = p_n$ получено уравнение распределения давления в рабочем конусе волоки:

$$p = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[e^{-\alpha p_n} - \frac{6\alpha \mu_{50} \left(\frac{50}{t_n}\right)^m v_0 x \left(h_b (h_b - x \operatorname{tg} \alpha_b) - h_0 \left(h_b - \frac{x \operatorname{tg} \alpha_b}{2} \right) \right)}{h_b^2 (h_b - x \operatorname{tg} \alpha_b)^2} \right],$$

где m – показатель степени, зависящий от кинематической вязкости масла; t_n – температура поверхности проволоки; p_n – давление смазки, поступающей в волоку после насадки.

На входе в зону деформации при $x = l$ имеем:

$$p = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[e^{-\alpha \cdot p_n} - \frac{3\alpha\mu_{50} \left(\frac{50}{t_n}\right)^m v_0 (h_b - h_0)^2}{h_b^2 \operatorname{tg} \alpha_b h_0} \right].$$

Для стандартных волок при средних обжатиях h_b велико по сравнению с h_0 , тогда последнее выражение упрощается:

$$p = -\frac{1}{\alpha} \ln \left[e^{-\alpha \cdot p_n} - \frac{3\alpha\mu_{50} \left(\frac{50}{t_n}\right)^m v_0}{\operatorname{tg} \alpha_b h_0} \right]. \quad (7)$$

Для определения давления смазки необходимо знать температуру смазки в насадке. Большая часть тепла, отводимого от слоя смазки, уносится с проволокой $Q_{пр}$, потери тепла через стенки волоки незначительны. По данным Шлегеля, волоки поглощают от 1 до 5 % всего тепла, выделяющегося при волочении. Учитывая это положение, считаем, что в стационарном процессе все выделившееся тепло уносится с проволокой $Q_{пр}$. Зная необходимое давление смазки на входе в зону деформации $p_{вх}$, было определено давление, которое должна развить насадка, чтобы обеспечить гидродинамический режим трения:

$$p_n = \frac{\alpha p_{вх} - \ln x}{\alpha},$$

где $x = \frac{e^{-\alpha \cdot p_n}}{e^{-\alpha \cdot p_{вх}}}$.

Необходимое давление смазки на входе определяется из условия пластичности для входящей в зону деформации проволоки:

$$p_{вх} = \sigma_T - \sigma_0,$$

где σ_T – предел текучести; σ_0 – напряжение противонапряжения проволоки от смазки в насадке.

Величина h_0 определяется из условия полного разделения поверхностей волоки и изделия, для этого h_0 должно превышать высоту микронеровностей протягиваемого изделия.

Также были получены уравнения для расчета давления на входе p_1 и на выходе p_2 напорной трубки для высокоскоростного волочения (рис. 3):

$$p_1 = \frac{6\mu v_0 l}{h^2 (1-2q)}; \quad (8)$$

$$p_2 = -\frac{1}{\alpha} \ln(1 - p_1 \alpha). \quad (9)$$

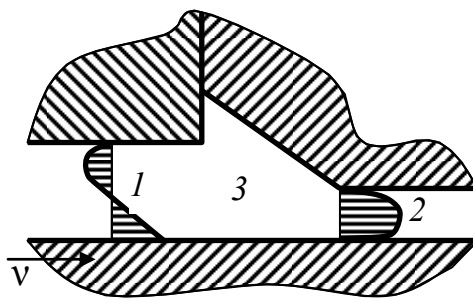


Рис. 3. Движение смазочного материала в зоне напорной трубки:
 1 – зона на входе напорной трубки; 2 – зона на выходе напорной трубки;
 3 – зона нагнетания смазочного материала

Пример расчета давления при волочении со скоростью 0,26 м/с для перехода диаметров проволоки с 2,01 на 1,821 мм и вязкости $\mu = 0,03 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, при изменении зазора h между проволокой и волокой и расходе смазочного материала, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Расчет давления для перехода диаметров проволоки с 2,01 на 1,821 мм

h , мм	q	p_1 , МПа	p_2 , МПа
0,082	0,1	0,877	0,918
0,091	0,15	0,672	0,695
0,100	0,20	0,523	0,536
0,109	0,25	0,412	0,420
0,118	0,3	0,327	0,332
0,127	0,35	0,262	0,265

Анализ табл. 1 показывает на то, что увеличение зазора вызывает увеличение расхода смазочного материала и уменьшение давления на входе и выходе напорной трубки-насадки.

С использованием формул (8), (9) можно проанализировать влияние основных факторов процесса гидродинамического волочения (l , v_0 , h , μ_0) на развиваемое насадкой давление.

С увеличением скорости наблюдается рост давления смазки; лишь для больших длин насадок скорости свыше 10 м/с не вызывают повышения давления из-за разогрева смазки. Длина насадки значительно влияет на развиваемое давление. Например, при скорости 5 м/с для $l = 5$ мм $p = 7,65 \text{ МН}/\text{м}^2$ (0,78 кгс/мм²), для $l = 40$ мм $p = 176,5 \text{ МН}/\text{м}^2$ (18 кгс/мм²), а для $l = 140$ мм $p = 1078 \text{ МН}/\text{м}^2$ (110 кгс/мм²). Дальнейшим увеличением длины можно получить еще более высокие давления смазки. Рост скоростей волочения и длин напорных труб-насадок вызывает увеличение температуры смазки в насадке. Разогрев будет больше при использовании более вязкой смазки.

Одним из основных параметров нагнетающих приспособлений является величина зазора h между поверхностью насадки и протягиваемого изделия. Увеличение зазора вызывает значительное падение развиваемого давления. Так, для $l = 80$ мм увеличение зазора с 0,05 до 0,1 мм влечет за собой падение давления с 667 МН/м² (68 кгс/мм²) до 96 МН/м² (9,8 кгс/мм²), а для $h = 0,2$ и 0,5 мм оно составит, соответственно, 14,7 (1,5) и 2,16 МН/м² (0,22 кгс/мм²). Для достижения высоких давлений при больших величинах зазора требуется значительная длина напорных труб.

Значительное влияние имеет температура входящей проволоки t_0 на развиваемое давление – с увеличением t_0 нагнетающая способность падает. Так, изменение t_0 от 20 до 40 °С вызывает падение давления для насадки длиной 40 мм в 5,5 раза. Повышение же t_0 до 100 °С приводит к падению давления в несколько десятков раз. Это объясняется уменьшением вязкости с температурой. Следовательно, для обеспечения гидродинамического трения при волочении на жидких смазках первостепенное значение имеет охлаждение проволоки на барабанах волочильной машины, при этом машины мокрого волочения предпочтительней из-за более эффективного охлаждения. Одним из достоинств применения жидких смазок при волочении является их высокая охлаждающая способность по сравнению с охлаждающей способностью воздуха на машинах сухого волочения.

С увеличением вязкости давление смазки в насадке растет. Особенно интенсивный рост давления наблюдается до значений вязкости $\mu_{50} = 0,03 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ (0,3 Пз), с дальнейшим повышением вязкости рост давления замедляется. При этом нужно учитывать, что с увеличением вязкости охлаждающая способность смазки снижается.

Влияние относительного расхода на нагнетающую способность напорной трубки: при $q = 0,5$ $p = 0$, т. е. происходит безнапорное движение смазки. Относительный расход определяется количеством смазки, уносимой через рабочую волоку с проволокой. Расход смазки зависит от величины микронеровностей проволоки. Влияние расхода будет значительней на первых проходах маршрута, так как по мере утончения проволоки шероховатость ее будет уменьшаться. Более высокому качеству поверхности будет соответствовать более высокая нагнетающая способность инструмента. Развиваемое напорной трубкой давление зависит от рода протягиваемого материала. Чем выше теплопроводность металла, тем интенсивней отвод тепла с проволокой, ниже температура смазки, выше нагнетающая способность.

Для практического применения напорных волок в мокром волочении был разработан инструмент для волочения проволоки [5]. Особенностью разработанной конструкции является достижение равномерного смазочного слоя с пониженной вязкостью. Инструмент для волочения проволоки, представленный на рис. 6, включает корпус 1, деформирующую волоку 2, напорную волоку 3, содержащую кольцо 4, и эластичный кольцевой уплотнитель 5, установленный между напорной волокой и корпусом для создания нежесткого закрепления напорной волоки, которое обеспечивает повышение вибростойкости устройства и сбалансированное состояние между волокой и проволокой 6, снижающее величину контактного трения между ними. Эластичный кольцевой уплотнитель снижает вибрацию проволоки, что также позволяет уменьшить количество ее обрывов во время волочения. Кроме того, для достижения поставленной задачи устанавливается определенная величина зазора между проволокой и внутренним каналом напорной волоки, гарантирующая непрерывное обеспечение эффективного экранирующего слоя волочильной смазки за счет ее стабильной подачи в очаг деформации. Это обеспечивает повышение давления между напорной и деформирующей волоками, что приводит к принудительной подаче эмульсии к деформирующей волоке и снижению усилия при волочении, повышению стойкости деформирующих волок.

Устройство работает следующим образом: при волочении проволока проходит через канал напорной волоки. Эластичный кольцевой уплотнитель напорной волоки снижает трение между проволокой и волокой, зазор между которыми обеспечивает захват подаваемой водоземulsionной смазочно-охлаждающей жидкости (ВСОЖ) поверхностью проволоки и ее движение по направлению волочения. В результате в пространстве между напорной и деформирующей волокой создается избыточное

давление ВСОЖ. Это давление способствует принудительной подаче ВСОЖ в зону деформации проволоки в деформирующей волоке. Принудительная подача ВСОЖ обеспечивает рост толщины смазочного слоя в зоне деформации в деформирующей волоке. Повышение толщины смазочного слоя способствует снижению усилия волочения, износа рабочей волоки.

Были проведены эксперименты по определению величины оптимального зазора между проволокой и внутренним каналом напорной волоки, результаты которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость зазора между проволокой и внутренним каналом напорной волоки и усилием волочения, давлением на выходе из напорной волоки

Зазор между проволокой и внутренним каналом напорной волоки, в % от диаметра проволоки на входе в напорную волоку	Усилие волочения со скоростью 0,26 м/с для перехода диаметров проволоки с 2,01 на 1,821 мм	Давление на выходе напорной волоки, МПа
9	1575	0,207
10	1480	0,345
11	1382	0,536
12	1390	0,520
13	1488	0,332
14	1510	0,265

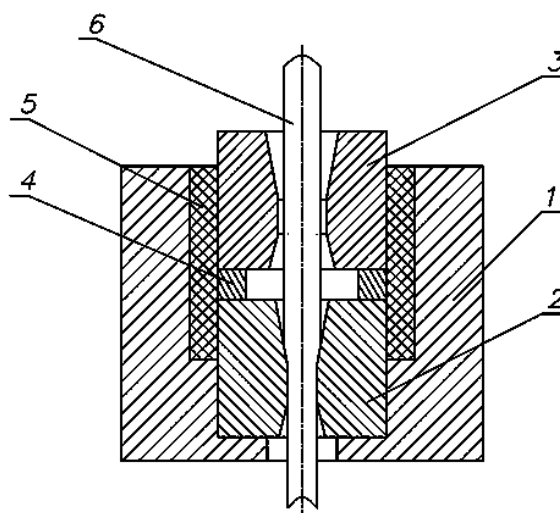


Рис. 4. Инструмент для волочения проволоки:
1 – корпус; 2 – деформирующая волока; 3 – напорная волока,
4 – кольцо; 5 – уплотнение; 6 – проволока

Анализ табл. 2 показывает на наличие эффекта снижения усилия и давления при величине оптимального зазора между проволокой и внутренним каналом напорной волоки, равной 11–12 % от диаметра проволоки на входе в напорную волоку. Снижение усилия и давления волочения может быть обосновано устойчивой подачей водоземulsionной смазки к деформирующей волоке. Увеличение или уменьшение зазора относительно оптимальной величины зазора приводит к возрастанию усилия волочения и уменьшению давления на выходе напорной волоки.

Заключение

В ходе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Использование напорных волок в мокром волочении возможно.
2. Получена зависимость для расчета давления, создаваемого напорной волокой в слое смазки на входе в деформирующую волоку.
3. Для волочения проволоки с напорной волокой на жидкой смазке предложено использование инструмента, включающего корпус, деформирующую волоку, напорную волоку, эластичный кольцевой уплотнитель для создания нежесткого закрепления напорной волоки, который обеспечивает повышение вибростойкости устройства и обеспечивает сбалансированное состояние между волокой и проволокой, снижающее величину контактного трения между ними.
4. Величина зазора между проволокой и внутренним каналом напорной волоки, равная 11–12 % от диаметра проволоки на входе в напорную волоку, обеспечивает максимальный эффект экранирующего слоя волочильной смазки за счет ее стабильной подачи в очаг деформации.

Литература

1. Битков, В. В. Технология и машины для производства проволоки / В. В. Битков // УрО РАН, Екатеринбург, 2004. – 346 с.
2. Колмогоров, В. Л. Гидродинамическая подача смазки / В. Л. Колмогоров, С. И. Орлов, Г. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1975. – 256 с.
3. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние в проволоке из высокоуглеродистой стали / М. Н. Верещагин [и др.] // Сталь. – 2007. – № 12. – С. 53–58.
4. Численное моделирование и исследование влияния контактного трения на распределение температурных полей и напряженно-деформированное состояние в стальной проволоке при высокоскоростном волочении / М. Н. Верещагин [и др.] // Литье и металлургия. – 2009. – № 4. – С. 126–129.
5. Инструмент для волочения проволоки : пат. на полезную модель Респ. Беларусь № 7793, МПК В21С 3/00 / М. Н. Верещагин, Ю. Л. Бобарикин, С. И. Прач, С. В. Авсейков ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; заявка № и 20110337 от 28.04.2011.

Получено 08.10.2014 г.