



The different methods at determination of tensile strength and cross-sectional area of flat wire are analyzed. Such technological parameters as drawing-out and widening at upset spreading are examined.

А. В. ВЕДЕНЕЕВ, О. И. ИГНАТЕНКО, РУП «БМЗ»

ОСВОЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛЮЩЕННОЙ ЛЕНТЫ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ШЛАНГОВ

Постоянное техническое совершенствование резино-технических изделий приводит к появлению новых видов армирующих материалов. Одной из последних известных разработок является производство плющеной проволоки для рукавов высокого давления [1].

Армирование резиновых шлангов вызвано желанием его усилить для обеспечения работоспособности в условиях высоких давлений. Наибольшей эффективностью обладают шланги, армированные стальной проволокой. При этом происходит снижение толщины стенки шланга за счет использования проволоки повышенной прочности или за счет уменьшения диаметра проволок с повышенной частотой навивки. Дальнейшее уменьшение толщины проволоки с сохранением площади поперечного сечения привело к появлению в качестве армирующего материала плющеной проволоки. Одним из положительных факторов использования плющеной проволоки является предотвращение разрушения резины, расположенной между слоями оплетки, что увеличивает срок службы рукава высокого давления. Использование плющеной проволоки в сравнении с круглой, у которой диаметр равен толщине плющеной проволоки, позволяет повысить давление внутри рукава за счет более высокого запаса прочности по сравнению с круглой проволокой [2].

Общие тенденции развития рукавов высокого давления, армированных латунированной проволокой, направлены на увеличение объемов выпу-

скаемой продукции на существующем технологическом оборудовании. Это направление можно реализовать, применяя плоскую латунированную проволоку вместо круглой.

К примеру, плоская проволока размером 0,30×0,60 мм при толщине, равной диаметру проволоки 0,30 мм, имеет площадь поперечного сечения в 2 раза больше, что дает преимущества в увеличении шага нанесения оплетки на существующем оплеточном оборудовании, а соответственно и повышает его производительность.

С точки зрения качественных характеристик применение плоской проволоки позволит производить шланги с повышенной разрывной нагрузкой, улучшить силу сцепления с резиной, увеличить циклическую выносливость при знакопеременном изгибе. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики проволоки диаметром 0,30 мм и плющеной проволоки размером 0,30×0,60 мм.

Число скручиваний оценивали на длине образцов, равным 100h, где h – ширина проволоки. Число гибов определяли при перегибах через оправку с радиусом губок 2,5 мм. Уровень выносливости находили при испытании 3-роликовым тестом по методу «Содеталь». Расстояние между роликами – 28,5 мм, диаметр роликов – 22 мм. Растягивающую нагрузку устанавливали равной 10% от разрывного усилия проволоки.

Из таблицы видно, что явным преимуществом проволоки плоского сечения перед круглой явля-

Т а б л и ц а 1. Сравнительные характеристики проволоки РМЛ диаметром 0,30 мм и плоского сечения 0,30×0,60 мм

Проволока	Геометрические параметры, мм	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	Разрывное усилие, Н	Число гибов (r = 2,5 мм)	Число скручиваний (L = 100h)	Содержание меди в покрытии, %	Масса латунного покрытия, г/кг	Пористость покрытия, мг Fe/г проволоки	Шероховатость поверхности	Выносливость по 3-роликовому тесту (Содеталь), циклы	Адгезия, Н/мм
Круглая	0,301	2876	205	123	53	67,4	4,35	3,4	уд	1473	15,5
Требования	0,30±0,01	2750–3050	204,5±10,5	Мин. 85	Мин. 38	67,5±4,0	5,0±1,5	–	–	–	–
Плоская	0,30×0,60	2797	494	104	36	67,1	3,5	3,1	уд	3356	22,9
Требования	0,30×0,60±0,01	2750–3050	Мин. 462	Мин. 50	Мин. 20	67,5±4,0	4,0±2,0	–	–	–	–

ется превышение разрывного усилия в 2,41 раза (при меньшем временном сопротивлении разрыву), увеличение адгезии на единицу длины в 1,5 раза, возрастание выносливости на 3-роликовом тесте в 2,3 раза. Показатели пластичности у плоской проволоки несколько ниже среднестатистического уровня для круглой проволоки, но соответствуют требованиям последней. Оценка пластичности проволоки через показатель скручивания для плоской проволоки является некорректной вследствие высокого уровня напряжения на боковой поверхности. В остальном уровень качества круглой проволоки диаметром 0,30 мм и плоской размером 0,30×0,60 мм находится на одном уровне.

Для производства плющеной проволоки, как правило, используют специализированные прокатные станы с приводными прокатными валками. При этом в стане требуется использование системы согласования скоростей движения проволоки между клетями, пробуксовывание валков приводит к образованию налипания частиц ленты на поверхность валков, ухудшая при этом качество поверхности ленты. В качестве примера можно привести плющильный стан 3 × 2 / 100, который является непрерывным станом плющения, состоящим из трех клеток с двумя горизонтальными валками каждая.

Схема плющильного стана приведена на рис. 1, а технические характеристики – в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики плющильного стана 3 × 2 / 100

Технические характеристики	Стан 3 × 2 / 100
Число рабочих клеток, шт.	3
Размеры валков, мм: диаметр валков длина бочки	100 50
Материал валков	Твердый сплав
Размеры готовой продукции, мм: толщина ширина	0,1–1,0 0,3–3,0
Мощность привода, кВт	40

Прокатка на современном плющильном стане осуществляется следующим образом. Проволока

с размотки 1 при необходимости проходит через рихтовку 2 и деформируется в рабочих клетях 4. Между рабочими клетями расположены петлеобразователи с датчиками положения 5, регулирующие соотношение скоростей рабочих клеток и других узлов стана. При необходимости кромки ленты обкатывают в клетях 6 с вертикальными валками (эджерах), расположенными перед рабочими клетями. На выходе из стана при необходимости осуществляется чистовая калибровка профиля ленты на многовалковой универсальной клети 7. Размеры ленты контролируют летучим микрометром 8. Для протягивания ленты через универсальную клеть установлен вытяжной барабан – кабестан 3. Готовая лента поступает на барабан моталки 9. Количество рабочих клеток и необходимость установки многовалковой универсальной клети выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к готовой плющеной ленте. Контроль за процессом прокатки и управлением станом осуществляется с помощью компьютера.

Многие изготовители проволоочной продукции не имеют возможности приобретения и установки дополнительных и дорогостоящих плющильных станов. Иногда потребителю требуется плющеной проволока небольшой ширины. В этом случае загрузка плющильного стана является неоптимальной и создает дополнительные затраты, связанные с лишней технологической операцией, а изменчивость потребительского рынка не обеспечит постоянной загруженностью высокоскоростное оборудование. В современном производстве зародилась и находит дальнейшее развитие идея модернизации имеющегося оборудования по модульному типу [3]. Основная особенность создания оборудования модульного типа – это создание на ограниченной производственной площади мобильных единиц оборудования, комбинация блоков которых позволяет создавать оптимально-функциональный вид под конкретные производственные задачи. Данный подход позволил доработать имеющиеся волочильные станы под производство плющеной проволоки, установив на финишной операции не

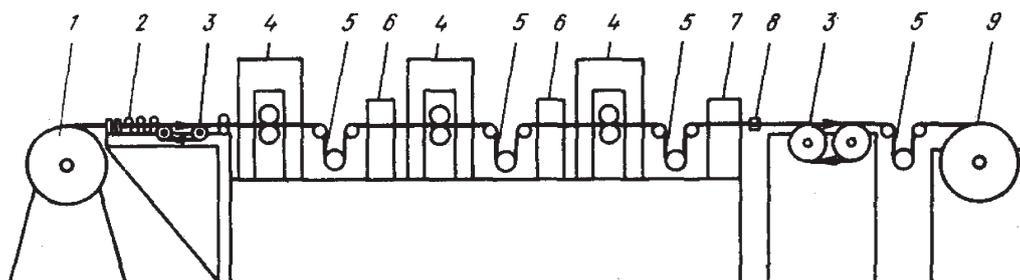


Рис. 1. Схема плющильного стана: 1 – размоточное устройство; 2 – рихтовка; 3 – кабестан; 4 – клеть; 5 – датчик положения; 6 – клеть с вертикальными валками; 7 – калибровочная клеть; 8 – летучий микрометр; 9 – намоточное устройство

приводные плющильные клетки или одноплоскостные роликовые волокни. В этом случае для привода вытяжных барабанов используются существующие электродвигатели, создавая таким образом универсальное оборудование под разные технологические задачи без дополнительных затрат электроэнергии.

Вторым вопросом является выбор конструкции намоточного устройства. При определении конструктивных особенностей линии плющения особое внимание требуется уделять качеству намотки ленты, от которой может зависеть ее прямолинейность. Так как современные волочильные станы обладают системами с регулируемой плотностью намотки проволоки на катушку натяжением, то данная проблема представляется решаемой. При этом дополнительная нагрузка на привод намотки определяется исходя из временного сопротивления разрыву волоченой проволоки, величины суммарного обжатия при плющении, диаметра валков [4].

Изготовление плющеной стальной проволоки производится, как правило, из термически обработанной заготовки. В работе [12] приведена технология получения стальной латунированной ленты размером 0,4×1,2 мм из волоченой проволоки диаметром 0,78 мм. Технологическая задача получения плоской проволоки РМЛ рассматривается исходя из требуемой прочности. Параметры плющеной проволоки определяли из уровня изгибной жесткости (отношение толщины h к ширине $b = 0,25-0,8$).

Ввиду того что полученная лента должна навиваться на дорн под определенным углом, большая ширина плющеной проволоки создает высокий уровень напряжений на боковой наружной поверхности ленты, в результате чего ухудшаются эксплуатационные характеристики шланга. Поэтому для шлангов предположили использовать ленту с отношением толщины h к ширине b , равным 0,5–0,9.

Известно, что при испытании на разрыв проволоки временное сопротивление разрыву определяется исходя из геометрических размеров в поперечном сечении:

$$\sigma_B = \frac{F}{S}, \text{ МПа,}$$

где F – разрывное усилие плоской проволоки, Н; S – площадь поперечного сечения плоской проволоки, мм².

Геометрические параметры плоской проволоки могут различаться в широком диапазоне. Форма плоской проволоки будет зависеть от способа де-

формирования, конструкции роликовой клетки, характеристик материала проволоки-заготовки. Так, например, в работе [5] показано, что для отожженной проволоки радиус скругления боковой части определяется как $r = (0,64 - 0,67) \cdot 2h$, радиус скругления при плющении проволоки после волочения – как $r = (0,70 - 0,77) \cdot 2h$.

Кромки ленты имеют естественные закругления, которые формируются при плющении в плоских валках. Геометрическая форма закругленного конца проволоки описывается выражением

$$R = B/2 + h^2/8B,$$

где R – радиус закругления; B – высота дуги закругления; h – толщина плющеной проволоки.

Данные эмпирические выражения не описывают поведение материала в зависимости от содержания углерода и состояния пластичности, от которых зависит радиус закругления. В связи с этим многими исследователями [6–9] предприняты попытки точного определения площади поперечного сечения. Согласно ГОСТ 11701-84, площадь поперечного сечения плоской ленты рассчитывают из выражения:

$$S_{\text{п}} = bh - 0,18h^2 = h^2(b/h - 0,18).$$

Для определения площади поперечного сечения проволоки S можно использовать метод, применяемый для фасонной проволоки [14]. При этом мерный образец плоской проволоки (1 м) взвешивается с точностью до третьего знака и, задавая удельную плотность проволоки, равную плотности волоченой проволоки, рассчитывается площадь поперечного сечения. Пока более точного и менее трудоемкого способа определения площади поперечного сечения и соответственно временного сопротивления разрыву найти не удалось.

По этому методу первоначально определяется приведенный диаметр проволоки через массу 1 пог. м проволоки:

$$d = \sqrt{\frac{m}{0,785\rho}}, \text{ мм}$$

где d – приведенный диаметр проволоки; m – масса 1 пог. м проволоки, г; ρ – плотность проволоки ($7,86 \cdot 10^{-3}$ г/мм³).

Тогда площадь поперечного сечения плоской проволоки определится как площадь круга приведенного диаметра:

$$S = 0,785d^2, \text{ мм}^2.$$

В работе [7] приведена следующая эмпирическая формула для расчета площади поперечного

сечения плющеной ленты через ее габаритные размеры:

$$S = \left(1 - \frac{\pi h}{4b}\right)^{0,157} bh.$$

На практике для определения временного сопротивления разрыву плоской проволоки были предложены две формулы: через коэффициент вытяжки, рассчитанный через массу тонкой проволоки-заготовки и плющеной проволоки, и просто через массу плющеной проволоки с переводом на диаметр.

Найдем временное сопротивление плющеной проволоки по первому способу:

$$\sigma_B^k = k_{упр} \sigma_B^H \sqrt[4]{\mu_{сум}},$$

где σ_B^k – временное сопротивление разрыву ленты после плющения; σ_B^H – временное сопротивление латунированной проволоки перед плющением; $k_{упр}$ – коэффициент упрочнения при плющении.

Суммарная вытяжка полосы ($\mu_{сум}$) определяется из выражения:

$$\mu_{сум} = \left(\frac{\pi d_3}{P_{л}}\right)^2,$$

$$P_{л} = b + h(\pi - 1),$$

где d_3 – диаметр заготовки перед плющением; $P_{л}$ – периметр плющеной проволоки; b , h – ширина и толщина ленты.

Площадь поперечного сечения находим из выражения:

$$S = \frac{F}{\sigma_B^k}.$$

Рассчитываем временное сопротивление плющеной проволоки по второму способу:

$$\sigma_{Bпл} = \frac{P_{пл}}{0,7854(d_{пл})^2},$$

где $\sigma_{Bпл}$ – временное сопротивление разрыву плющеной проволоки; $P_{пл}$ – разрывное усилие плющеной проволоки; $d_{пл}$ – приведенный диаметр плющеной проволоки:

$$d_{пл} = \sqrt{\frac{m_{пл}}{0,7854 \cdot 7,85}},$$

где $m_{пл}$ – масса 1 м плющеной проволоки.

Тогда площадь поперечного сечения плющеной проволоки:

$$S = 0,785d_{пл}^2.$$

При проведении приемочных испытаний принято ориентироваться на официально разработанные документы (ГОСТ, ТУ, Нормы и т. д.), но при разработке новых видов продукции возникают вопросы в точности измерений. Проведем сравнительные расчеты площади поперечного сечения плоской проволоки и временного сопротивления разрыву различными методами. В качестве примера взята плющеной проволока толщиной 0,30 и шириной 0,60 мм с разрывным усилием 505 Н. Данные расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3. Данные расчета площади поперечного сечения плоской проволоки и временного сопротивления разрыву различными методами

Методика расчета	Значения временного сопротивления разрыву, МПа	Площадь поперечного сечения, мм ²
По ГОСТ 11701-84	3083	0,1638
Через коэффициент вытяжки ($\mu = 2,6\%$)	3138	0,1609
Через геометрические размеры плющеной проволоки	3034	0,1664
Через массу 1 м плющеной проволоки	3121	0,1618
Через наложение координатной сетки на увеличенное фотографическое изображение поперечного сечения плющеной проволоки	2988	0,1690

Как видно из таблицы, значения временного сопротивления разрыву по разным методикам могут значительно колебаться.

Правильный выбор методики определения площади поперечного сечения позволит рационально рассчитывать степени вытяжки и уширения проволоки при деформации в плоских роликах.

Современные волочильные станы при решении определенных технологических задач (например, получение холоднодеформированной арматурной проволоки) и с целью экономии используют в одной технологической цепи совмещенные технологические операции волочения и прокатки [4]. Это позволяет получать новый вид продукта на традиционном волочильном стане, повысив при этом его производительность. При этом следует учитывать кинематические вытяжки плющеной проволоки, которые будут отличаться от вытяжки проволоки при волочении. Особенно это необходимо учитывать при плющении на станах тонкого волочения, где присутствует жесткая кинематическая связь между тянущими шкивами и вытяжным барабаном.

Значение вытяжки при плющении зависит от уширения получаемой ленты, которая зависит от

Таблица 4. Определение уширения плющеной ленты в зависимости от диаметра заготовки и ее прочности

Проволока для плющения				Суммарная вытяжка при плющении	Плющенная проволока				Изменение прочности, МПа
диаметр заготовки, мм	диаметр проволоки, мм	суммарная деформация при волочении, %	временное сопротивление разрыву, МПа		толщина ленты h , мм	ширина ленты b , мм	площадь поперечного сечения, мм ²	временное сопротивление разрыву, МПа	
0,85	0,32	85,8	1893	1,536	0,15	0,49	0,0740	2017	24
0,85	0,291	88,3	1988	1,652	0,15	0,39	0,0580	2134	146
0,85	0,242	91,9	2146	1,711	0,15	0,26	0,0385	2399	253
1,14	0,356	90,2	2121	1,474	0,15	0,60	0,0896	2308	187
1,14	0,298	93,2	2306	1,553	0,15	0,43	0,0640	2498	192
1,14	0,247	95,3	2568	1,560	0,15	0,30	0,0450	2689	121

физико-механических свойств материала волоченой проволоки, степени обжатия плоскими валками и способа деформации (прокатка или волочение) [13].

Для определения уширения проволоки и выбора диаметра заготовки первоначально провели опытное плющение проволоки до толщины 0,15 мм на одноклетьевом устройстве с неприводными твердосплавными валками (табл. 4).

Схемы главных деформаций определяют характер изменения физико-механических характеристик получаемой проволоки. В отличие от волочения круглой проволоки при плющении в неприводных валках на проволоку воздействуют одна сжимающая и одна растягивающая силы. При этом деформация проволоки происходит в трех направлениях: увеличение длины и ширины и уменьшение высоты. Исходя из схемы деформированного состояния, величина вытяжки проволоки при плющении будет значительно меньше, чем при волочении.

Как и при традиционном волочении, характеристика прочности плющеной проволоки зависит от диаметра и прочности проволоки-заготовки. Прочностные характеристики плющеной проволоки в этом случае будут зависеть от прочности проволоки-заготовки после волочения и величины суммарного обжатия при плющении (рис. 2).

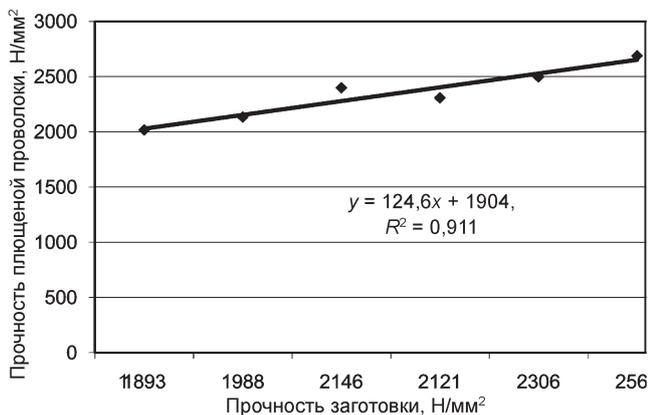


Рис. 2. Зависимость прочности плющеной проволоки от прочности волоченой заготовки

При использовании последовательно разнотипных видов деформации (волочение + плющение) упрочнение плющеной проволоки несколько снижается из-за эффекта Баушингера. Теория пластичности обычно не учитывает анизотропию материала. Между тем, из кристаллографических закономерностей пластической деформации вытекает, что сдвиги и вызываемое ими упрочнение и соответствующие им процессы должны происходить ориентированно в определенных направлениях, создавая текстуру [3].

Расплющивание круглой стальной проволоки уже при соотношении толщины к ширине плющеной проволоки менее 0,95 позволяет получить повышение пластичности. Однако при высоких суммарных обжатиях может возникнуть повышенная неравномерность напряженно-деформированного состояния плющеной проволоки в различных точках поперечного сечения.

Плющенная проволока, полученная с высоким уровнем неравномерности деформации, может иметь внутренние дефекты уже при соотношении толщины к ширине плющеной проволоки менее 0,8. Деформация внутренних слоев круглой проволоки под действием сдавливающих нагрузок со стороны плоских валков направлена по оси проволоки в направлении просвета между валками со скоростью большей, чем поверхностные слои, находящиеся в контакте с плоскими валками. При этом разность деформаций круглой проволоки может достигать уровня, когда в центре проволоки образуются полости вследствие образования напряжений растяжения, превышающих прочность материала проволок (рис. 3, 4). Шланг, армированный из такой проволоки, будет иметь низкий уровень циклов при испытании на усталостную выносливость из-за развития внутренних дефектов.

Для определения уширения проволоки при прокатке и выбора диаметра заготовки первоначально проведено опытное плющение на одноклетьевом устройстве с неприводными твердосплав-



Рис. 3. Вид продольной трещины на плющенной проволоке

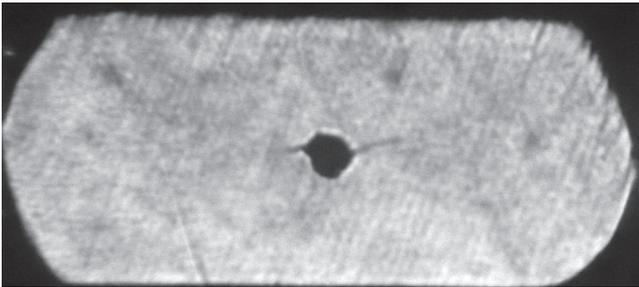


Рис. 4. Полость в плющенной проволоке, образованной под воздействием внутренних напряжений

ными валками. В процессе плющения через одну пару твердосплавных валков единичное обжатие составило 56,3%, уширение – 24,8%, что привело к быстрому разогреву твердосплавных валков и появлению центральных разрывов (расслоений).

При плющении деформация уширения в центре будет всегда выше, чем на поверхности, контактирующей с поверхностью плющильных валков. Это приводит к уменьшению плотности материала ленты в центре. Неравномерность деформации по толщине ленты (максимальная на поверхности; минимальная в центре) при определенных степенях обжатия не позволяет повысить плотность и в сочетании с деформацией уширения в центре ленты могут появиться пустоты. Вероятность возникновения внутренних пустот увеличивается за счет проявления эффекта Баушингера вследствие сочетания различных схем деформации.



Рис. 5. Вид плющенной проволоки после обработки сдвливающими напряжениями со стороны закругленных концов

Одним из сдерживающих факторов избыточного уширения является обработка ребер ленты в обкатывающих роликах. Варьируя соотношением между уширением и вытяжкой при изготовлении плоской проволоки, проволока-заготовка при деформации плющения испытывает не только плоские напряжения от параллельных плющильных валков, приводящие к пластическому течению проволоки, но и сдвливающие напряжения со стороны закругленных концов в диапазоне 0,65–0,8 от временного сопротивления разрушению материала. Проволока, обработанная таким способом, не имеет в поперечном сечении пустот, полученных в результате упругих растягивающих напряжений (рис. 5).

Таблица 5. Сравнительные характеристики плющенной проволоки, полученной различными способами

Способ получения проволоки	Размеры проволоки, мм		Разрывное усилие, Н	Число скручиваний	Число гибов	Выносливость, число циклов
	ширина	высота				
По патенту WO2005108846[1]	0,60	0,30	477	27	78	2024
Со сдвливающими напряжениями с боковых сторон	0,60	0,30	468	27	88	3516

Из табл. 5 видно явное преимущество по числу гибов и выносливости плющенной проволоки с использованием сдвливающих напряжений со стороны закругленных концов в диапазоне 0,65–0,8 от временного сопротивления разрушению материала.

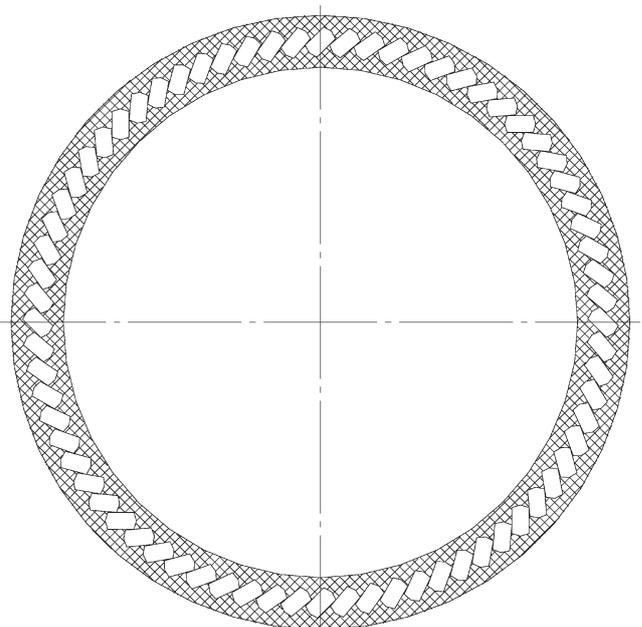


Рис. 6. Шланг с расположением плющенной проволоки в «замок»

С целью улучшения укладки ленты при навивке на дорн в процессе производства шлангов формы краев плющеной проволоки могут быть слегка изменены: в поперечном сечении может быть закругленный край радиусной, эллиптической (переменного радиуса) или другой формы. Кроме того, форма края проволоки может иметь приплюснутый вид. При укладке такой проволоки в спиральную обмотку в шланг создается замковое соединение, увеличивая, таким образом, плотность прилегания проволок друг к другу, что предотвращает разрушение резины под действием внутреннего давления (рис. 6).

Для получения нового армирующего материала, используемого в рукавах высокого давления, не обязательно использовать специализированные плющильные станы. Для изготовления плющеной проволоки с отношением $h/b = 0,5 - 0,9$ возможно применение роликовых волок в потоке волочильного стана. Специальная обработка плющеной проволоки с использованием сдавливающих напряжений со стороны закругленных концов в диапазоне $0,65-0,8$ от временного сопротивления разрушению материала позволяет исключить образование полостей в теле проволоки, а также повысить уровень ее выносливости на трехроликовом тесте.

Литература

1. Пат. WO2005108846. Плоская высокопрочная проволока как упрочнитель шланга.
2. Пат. GB1239884. Усовершенствование РВД.
3. Веденеев А. В., Панизович В. С. Современные тенденции развития оборудования для свивки металлокорда // Литье и металлургия. 2005. № 4. С. 81–85.
4. Скороходов Н. Е. и др. Номограммы расчета технологии производства плющенных лент. М.: Металлургия, 1980.
5. Kobayashi K., Asakawa M., Kobayashi M. Характер изменения деформации круглой проволоки при обжатии с использованием цилиндрического инструмента и анализ ширины, образующейся при плоской прокатке // Wire Journal International, September, 2005. P. 74–79.
6. Злотников М. И. Производство плющеной ленты. М.: Металлургиздат, 1951.
7. Кривошеков В. Л. Формоизменение и силовые параметры при прокатке плющенных лент // Сталь. 2001. № 5. С. 47–50.
8. Песин А. М., Куранов К. Ю. К оценке эффективности объемного конечно-элементного моделирования плющения ленты и обкатки кромок в вертикальных валках // Изв. Челябин. науч. центра. 2003. Вып. 2(19). С. 51–57.
9. Куранов К. Ю., Песин А. М. Изучение формоизменения при плющении лент специального назначения // Производство проката. 2006. № 4. С. 18–22.
10. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974.
11. Битков В. В. Технология и машины для производства проволоки. Екатеринбург: Имаш УроРАН, 2004.
12. Кривошапов В. В., Рудаков В. П. и др. Освоение производства невитой металлоарматуры для автошин // Сталь. 1997. № 10. С. 52–55.
13. Вудолонг Уширение при плющении проволоки // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1994. № 3. С. 19–22.
14. ГОСТ 10446–80. Проволока. Метод испытания на растяжение.