

УДК 621.778

Харитонов В.А., Витушкин М.Ю., Усанов М.Ю.

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Аннотация. Провода воздушных линий электропередач подвержены статическим и динамическим нагрузкам. Большое влияние на работоспособность проводов оказывает их жесткость. Наиболее эффективным способом повышения жесткости провода является увеличение прочности стальной проволоки. Согласно российским стандартам требование по минимальному пределу прочности стальной оцинкованной проволоки составляет от 1380 до 1450 Н/мм² в зависимости от диаметра проволоки. За рубежом аналогичную проволоку изготавливают и с более высокими прочностными характеристиками: предел прочности проволоки европейского производства может составлять от 1900 до 2300 Н/мм². В данной работе выявлены основные способы повышения прочности проволоки, оцинкованной на готовом размере, рассмотрены их способы реализации и недостатки. К данным способам можно отнести: повышение массовой доли углерода в стали, получение мелкодисперсной структуры при патентировании, увеличение степени деформации при волочении, снижение температуры оцинкования и времени выдержки в ванне оцинкования, легирование кремнием или ванадием. Большое влияние на показатели качества проволоки, такие как прочность и пластичность, а также затраты на ее производство оказывает применяемый маршрут волочения. Приведен пример технологии получения высокопрочной оцинкованной проволоки для сердечников проводов. Применение высокоуглеродистой стали, патентирования, низкотемпературного оцинкования и нового многократного маршрута волочения с суммарной степенью деформации в интервале 80-85% обеспечивает повышение жесткости проводов ЛЭП в 1,2-1,3 раза.

Ключевые слова: провода электропередач, жесткость, проволока стальная, состав, технология, конкурентоспособность.

Введение

Современный этап разработок новых механических устройств и систем в энергетике, специальном машиностроении, строительстве во многом связан с созданием гибких конструкций, конфигурация которых может значительно изменяться в процессе нагружения. Гибкие элементы этих конструкций могут иметь сложную внутреннюю структуру. Деформации таких элементов часто являются связанными, а жесткостные параметры – величинами переменными, зависящими от внешних нагрузок и текущей геометрической конфигурации [1].

Примерами таких конструкций со сложной внутренней структурой являются провода, тросы и кабели воздушных линий электропередач (ЛЭП). Они представляют собой достаточно сложные проволочные конструкции, состоящие из нескольких повивов, т.е. проволочных слоев, уложенных друг на друга под разными углами относительно оси провода, сердечником которого являются одна или несколько скрученных проволок повышенной прочности в центральной части провода. Проволоки, образующие один повив, изготавливаются, как правило, из одного и того же материала. В России наиболее распространенным типом провода является провод АС, сердечник которого сделан из стальных оцинкованных проволок, а токопроводящие – из алюминиевого сплава. Для предотвращения раскручивания соседние повивы должны иметь различное направление скрутки [1].

Общий вид сталеалюминиевого провода представлен на рис. 1, а его конструкция – на рис. 2.



Рис. 1. Сталеалюминиевый провод

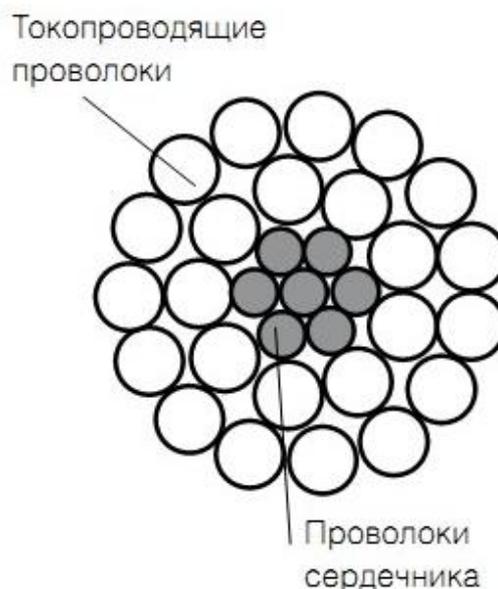


Рис. 2. Конструкция сталеалюминиевого провода

С точки зрения механики и технологии изготовления к проводам следует отнести и стальные молниезащитные тросы, расположенные над проводами воздушной ЛЭП, конструкции которых подобны проводам [1].

Жесткость проводов линий электропередач

При проектировании или реконструкции воздушных ЛЭП в расчет прилагаются как статические, так и динамические режимы нагружения провода, возникающие в результате воздействия собственного веса, гололеда и ветрового потока. При этом большое влияние на работоспособность проводов оказывает их жесткость [1].

Жесткость – это свойство каната (а как было показано выше, провод конструктивно и по технологии является таковым) сопротивляться возникновению в нем деформаций (особенно при изгибе и кручении) в пределах упругости. Жесткость каната зависит от его типа и конструкции, рода и вида свивки, диаметра проволок и их прочности [2].

При заданных конструкцией режимах свивки и материалах провода наиболее действенным путем повышения его жесткости является получение высокой прочности стальных проволок.

Проволока для сердечников проводов

В России стальную оцинкованную проволоку для сердечников сталеалюминевых проводов изготавливают с требованиями по ГОСТ 9850-72 на таких предприятиях черной металлургии, как АО «БМК», ОАО «ММК-Метиз», ОАО «Северсталь-Метиз».

Требование по минимальному пределу прочности стальной оцинкованной проволоки по ГОСТ 9850 составляет от 1380 до 1450 Н/мм² в зависимости от диаметра проволоки.

За рубежом аналогичную проволоку изготавливают и с более высокими прочностными характеристиками. Например, американский стандарт ASTM B958-08 предъявляет следующие требования по прочности для проволоки диаметром 2,29-3,04 мм: не менее 1790 Н/мм² для проволоки класса «Extra» и не менее 1900 Н/мм² для проволоки класса «Ultra».

В рамках данной работы произведены испытания проволоки европейского производства, результаты которых приведены в табл. 1.

Перед метизным производством нашей страны встает задача получения аналогичного продукта с це-

лью импортозамещения в условиях технического прогресса.

Для поиска решения необходимо проанализировать действующую технологию изготовления проволоки для сердечников проводов.

Технология изготовления проволоки для сердечников проводов

При изготовлении проволоки в отечественной промышленности используется сорбитизированная катанка из сталей марок 60-75. После подготовки поверхности осуществляют многократное волочение в монолитных волоках, а завершающей операцией является горячее оцинкование проволоки. Ввиду того, что горячее оцинкование при температуре 450-480°C осуществляется на проволоке готового размера, происходит разупрочнение проволоки на 50-250 Н/мм², в зависимости от степени её наклепа при волочении.

При использовании данной технологической схемы возможны два направления повышения прочности проволоки:

- повышение предела прочности заготовки под оцинкование после волочения;
- снижение разупрочнения при оцинковании.

Снижение разупрочнения при горячем оцинковании может осуществляться за счет снижения температуры оцинкования, уменьшения длительности пребывания проволоки в ванне оцинкования либо легирования стали.

Оптимальной температурой оцинкования проволоки можно считать диапазон 450–460°C. При увеличении температуры расплава будет возрастать разупрочнение проволоки. При снижении температуры ниже 450°C в «холодных» участках ванны может происходить кристаллизация цинка.

Теоретически возможно снизить разупрочнение уменьшением длительности пребывания проволоки в ванне оцинкования при снижении скорости обработки на цинковальном агрегате. Очевидным недостатком данного способа является снижение массы покрытия на проволоке.

Таблица 1

Результаты испытаний проволоки европейского производства

Маркировка проволоки	Предел прочности, Н/мм ²	Напряжение при 1% удлинении, Н/мм ²	Относительное удлинение δ_{200} , %	Материал
ACSS diam. 3,50 mm bezinal endcoated MEGA 2200 MPa	2290	1790-2100	5,5	Высокоуглеродистая сталь (C=0,92%), легированная Si=1,22%
ACSS diam. 3,46 mm bezinal endcoated MEGA 2150 MPa	2320	1880-2120	5,5-6,0	
ACSS diam. 2,76 mm bezinal endcoated EHS 1790 MPa	1900	1630	5,5-6,0	Высокоуглеродистая сталь (C=0,88%)

Разупрочнению стали при горячем оцинковании препятствуют некоторые легирующие элементы, такие как кремний и ванадий. Имеются сведения [3, 4] об изготовлении горячеоцинкованной на готовом размере проволоки диаметром от 5 до 7 мм с пределом прочности более 1960 МПа. Для изготовления используется высокоуглеродистая сталь, легированная кремнием и ванадием. При испытании проволоки европейского производства диаметром 3,50 мм с прочностью 2300 МПа также выявлено легирование стали кремнием в количестве 1,22%.

Легирование кремнием при производстве высокопрочной оцинкованной проволоки сопровождается определенными трудностями. Во-первых, кремний увеличивает время распада аустенита, поэтому при патентировании необходимо увеличение температуры свинца, что требует обработки заготовки отдельной партией. Во-вторых, при оцинковании кремнистых сталей возрастает толщина слоев хрупких фаз железоцинкового сплава, что ухудшает качество покрытия. Для исключения этого необходимы короткие выдержки в ванне оцинкования, а требуемую массу покрытия возможно получить за счет сохранения фазы чистого цинка при использовании азотного либо электромагнитного обтира.

Прочность холоднотянутой заготовки под оцинкование можно повысить либо за счет повышения прочности исходной заготовки, либо за счет увеличения суммарной деформации при волочении.

Увеличение степени суммарной деформации при волочении является малоперспективным способом повышения прочности проволоки для сердечников проводов. Во-первых, значительная часть прочности, полученная от наклепа, исчезнет при последующем горячем оцинковании. Во-вторых, перенаклеп проволоки может приводить к обрывам при волочении и оцинковании, а также ломкости при испытании проволоки на навивку. В-третьих, увеличение суммарной деформации требует увеличения кратности волочильного оборудования. Рациональным суммарным обжатием при волочении высокопрочной проволоки диаметром 2,50–3,50 мм можно считать диапазон 80–85%. При этом необходимо 8–9-кратное волочильное оборудование, пониженные скорости волочения и хорошее охлаждение проволоки на промежуточных барабанах ввиду высокой прочности проволоки и повышенного её нагрева при волочении.

Разработка новой технологии производства высокопрочной проволоки

На наш взгляд, основным инструментом повышения прочности проволоки для проводов является увеличение прочности исходной заготовки, которое возможно за счет увеличения массовой доли углерода в стали и получения более мелкодисперсной микроструктуры заготовки. Взамен использования сорбитизированной катанки необходимо введение операции патентирования заготовки. Для уменьшения межпла-

стинчатого расстояния в перлите необходимо небольшое снижение температуры ванны изотермического охлаждения и небольшое увеличение температуры нагрева в печи. В качестве сырья необходимо использовать высокоуглеродистую сталь, например марки У9А.

Так, катанка диаметром 6,5 мм из стали марки У9А после патентирования при температуре нагрева 1000°C и изотермическом охлаждении в свинце при температуре 490°C имеет предел прочности 1320–1350 Н/мм². Холоднотянутая проволока диаметром 2,65 мм, протянутая из такой заготовки, имеет предел прочности 2170–2230 Н/мм². После разупрочнения при горячем оцинковании при температуре 450–460°C готовая проволока будет иметь предел прочности 1950–2020 Н/мм², что соответствует требованиям классов «Extra» и «Ultra» стандарта ASTM B958-08. Для изготовления более высокопрочной проволоки необходимо использование высокоуглеродистой стали, легированной кремнием.

Для обеспечения устойчивости, стабильности и экономической эффективности процесса волочения высокопрочной проволоки необходимо выбрать рациональный маршрут волочения. Маршрут волочения должен обеспечить получение качественной проволоки с достаточным запасом прочности и пластичности, с максимально возможной производительностью и минимальными затратами на ее изготовление [5].

Для расчета маршрутов волочения используется новая методика и алгоритм расчета маршрутов волочения, отличающиеся тем, что на стадии проектирования маршрута волочения строится кривая «гидростатическое напряжение – усилие волочения», по которой выбираются рациональные обжатия для данных рабочих углов волок. Это обеспечивает возможность получения проволоки заданного уровня качества при минимальных энерго- и материалозатратах. Данная методика может применяться как при проектировании новых, так и при анализе действующих маршрутов волочения [6, 7].

Для получения качественной проволоки важно учитывать величину и знак действующего гидростатического напряжения на оси проволоки, который можно определить по кривой «гидростатическое напряжение – усилие волочения». Кроме того, данная кривая устанавливает зависимости между основными показателями процесса волочения, такими как гидростатическое напряжение на оси проволоки, единичное обжатие, значение дельта-фактора и усилие волочения. Показатель неравномерности распределения деформации по сечению в проволоке, получивший в технической литературе название «дельта-фактор», находится из выражения $\Delta = \frac{\alpha}{\varepsilon} (1 + \sqrt{1 - \varepsilon})^2$, где α – полуугол рабочего конуса волоки, рад; ε – единичное обжатие [8]. Гидростатическое напряжение находится как среднее суммы главных напряжений. Так, при значении дельта-фактора меньше 1,50 во всем объеме проволоки гидростатическое напряжение будет сжи-

мающим. При увеличении значения дельта-фактора увеличивается как область действия растягивающих напряжений, так и их величина. Так, при значении дельта-фактора 2,0 площадь действия растягивающего гидростатического напряжения в центре проволоки составит около 11% от общей площади проволоки.

С использованием предложенной методики был проведен анализ действующих маршрутов волочения с диаметра 7,0 на 3,05 мм (табл. 2) и с диаметра 6,5 мм на диаметр 2,65 мм (табл. 3). Рабочие углы волок $2\alpha = 12$ град. Коэффициент трения 0,08.

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и 3, показал, что значения дельта-фактора принимают значения от 1,78 до 2,66 для маршрута волочения с 7,0 на 3,05 мм, и от 1,63 до 2,32 для маршрута с 6,5 на 2,65 мм. Дельта-фактор принимает наибольшие значения на последних протяжках, что приводит к появлению высокого растягивающего гидростатического напряжения на оси проволоки, снижает ее пластические свойства и деформируемость, повышает вероятность обрыва.

Для исключения появления высокого растягивающего напряжения на оси проволоки разработаны новые маршруты волочения, при этом величина гидростатического напряжения от усилия волочения и значения дельта-фактора определялась согласно рис. 3. Для новых маршрутов волочения единичные обжатия принимаются равными 19-24%, что соответствует значениям дельта-фактора 2,0-1,5.

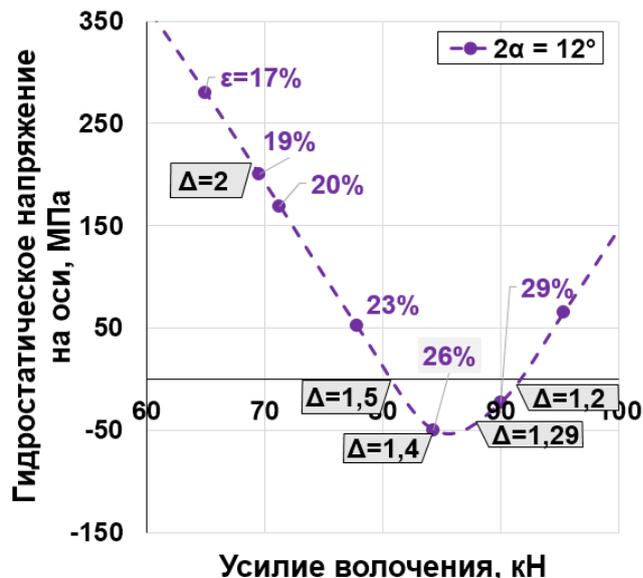


Рис. 3. Изменение величины гидростатического напряжения от усилия волочения и значения дельта-фактора для рабочих углов $2\alpha = 12^\circ$

Маршруты волочения, построенные по принципу линейного убывания единичных обжатий и, соответственно, линейного роста значений дельта-фактора, приведены в табл. 4 и 5. Рабочие углы волок $2\alpha = 12$ град. Коэффициент трения 0,08. Изменение значений дельта-фактора, для действующих и новых маршрутов волочения приведены на рис. 4.

Таблица 2

Анализ действующего маршрута волочения с диаметра 7,0 на 3,05 мм

Номер перехода	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Диаметр проволоки, мм	7,0	6,3	5,6	5	4,5	4,05	3,65	3,3	3,05
Единичное обжатие, %		19,00	20,99	20,28	19,00	19,00	18,78	18,26	14,58
Дельта-фактор		1,99	1,78	1,85	1,99	1,99	2,02	2,08	2,66
Предел прочности, кг/мм ²	131	138,09	146,47	155,01	163,39	172,23	181,42	190,80	198,47
Усилие волочения, кН		17,08	15,59	12,77	10,31	8,80	7,46	6,26	4,64
Усилие волочения суммарное, кН		17,08	32,67	45,44	55,75	64,55	72,00	78,26	82,91

Таблица 3

Анализ действующего маршрута волочения с диаметра 6,5 на 2,65 мм

Номер перехода	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Диаметр проволоки, мм	6,5	5,8	5,1	4,54	4,05	3,62	3,24	2,9	2,65
Единичное обжатие, %		20,38	22,68	20,76	20,42	20,11	19,89	19,89	16,50
Дельта-фактор		1,84	1,63	1,80	1,84	1,87	1,89	1,89	2,32
Предел прочности, кг/мм ²	133,7	141,54	150,94	159,98	169,38	179,16	189,38	200,17	209,40
Усилие волочения, кН		15,75	14,28	11,08	9,21	7,68	6,44	5,45	4,08
Усилие волочения суммарное, кН		15,75	30,03	41,12	50,32	58,00	64,44	69,90	73,97

Анализ нового маршрута волочения с диаметра 7,0 на 3,05 мм

Номер перехода	0	1	2	3	4	5	6	7
Диаметр проволоки, мм	7,0	6,12	5,37	4,74	4,21	3,76	3,38	3,05
Единичное обжатие, %		23,56	23,01	22,09	21,11	20,24	19,19	18,57
Дельта-фактор		1,56	1,60	1,68	1,77	1,85	1,97	2,04
Предел прочности, кг/мм ²	131	140,10	149,56	159,19	168,91	178,73	188,51	198,45
Усилие волочения, кН		19,75	15,89	12,70	10,22	8,31	6,77	5,64
Усилие волочения суммарное, кН		19,75	35,64	48,34	58,55	66,86	73,63	79,27

Таблица 5

Анализ нового маршрута волочения с диаметра 6,5 на 2,65 мм

Номер перехода	0	1	2	3	4	5	6	7
Диаметр проволоки, мм	6,5	5,68	4,97	4,37	3,84	3,39	2,99	2,65
Единичное обжатие, %		23,64	23,44	22,69	22,79	22,06	22,21	21,45
Дельта-фактор		1,56	1,57	1,63	1,62	1,68	1,67	1,74
Предел прочности, кг/мм ²	133,7	143,03	152,91	163,07	173,96	185,15	197,15	209,42
Усилие волочения, кН		17,42	14,15	11,33	9,37	7,55	6,29	5,09
Усилие волочения суммарное, кН		17,42	31,57	42,89	52,26	59,81	66,10	71,19

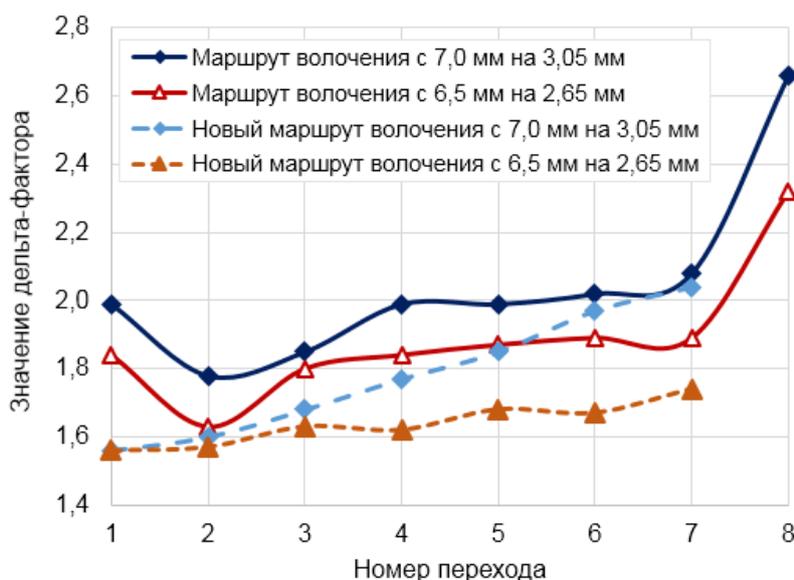


Рис. 4. Изменение значений дельта-фактора для действующего и новых маршрутов волочения

Как видно из табл. 4 и 5, новые маршруты позволяют снизить кратность волочения (на одну протяжку), улучшить равномерность деформации по сечению проволоки и снизить суммарное усилие волочения на 4,4% для проволоки диаметром 3,05 мм и на 3,8% для проволоки диаметром 2,65 мм, т.е. обеспечивая тем самым повышение твердости и конкурентоспособности проволоки.

Для волочения проволоки по предлагаемым маршрутам рекомендуется использовать современное волочильное оборудование немецкой фирмы KOCH, в частности станы KGT 25/7.

По методике, приведенной в работе [9], был выполнен расчет величины крутильных и изгибных жесткостей проводов марки АС с использованием стальных проволок повышенной прочности, показавший возможность повышения жесткости проводов ЛЭП в 1,2-1,3 раза, т.е. обеспечить повышение ее конкурентоспособности на отечественных и зарубежных рынках.

Заключение

1. Высокая жесткость и тем самым эксплуатационная стойкость проводов воздушных ЛЭП обеспечивает

ся в первую очередь прочностью стальных оцинкованных проволок сердечника, определяемой содержанием углерода в стали, дисперсностью микроструктуры, суммарной степенью деформации, маршрутом волочения и температурой оцинкования проволоки.

2. Применение высокоуглеродистой стали, патентирования, низкотемпературного оцинкования и многократного волочения по новым маршрутам волочения с суммарной степенью деформации в интервале 80-85% обеспечивает получение проволоки с требованиями по ASTM B958-08, повышение жёсткости проводов ЛЭП в 1,2-1,3 раза и снижение затрат на ее производство.

Список литературы

1. Виноградов А.А., Данилин А.Н., Рибинский Л.Н. Деформирование многослойных проволочных конструкций спирального типа. Математическое моделирование, примеры использования. М.: Изд-во МАИ, 2014. 168 с.
2. Подвесные канатные дороги / Беркман М.Б., Бовский Г.И., Куйбида Г.Г., Леонтьев Ю.С. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
3. Masafo Kaiso, Nobuhico Ibaraki, Yasuhiro Oki, Takaaki Minamida Development of a new hypereutectoid steel for high-strength wire // Wire Journal International. 2002. February, pp. 116 – 121.
4. Bell A., Hobson S., Wilkinson J. et al. Development of ultra-high-strength wire for offshore applications // Wire Journal International. 2008. May, pp. 78–88.
5. Харитонов В. А. Классификация способов ОМД по технологическим признакам при производстве проволоки // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 49–59.
6. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Совершенствование методики расчета маршрутов волочения для высокоуглеродистых сталей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 8. С. 92-95.
7. Методика совершенствования и проектирования маршрутов волочения проволоки / М.Ю. Усанов, В.А. Харитонов, Л.Э. Пыхов, Н.Ю. Сметнева // Сталь. 2018. № 6. С. 42–43.
8. Бэкофен В. Процессы деформации: пер. с англ. М.: Металлургия, 1977. 288 с.
9. Модель провода воздушной линии электропередачи / Шалашилин В.И., Данилин А.Н., Цветков Ю.Л., Рыжов С.В. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. Т.11. №4. С. 564-572.

Сведения об авторах

Харитонов Вениамин Александрович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: hva-46@yandex.ru

Витушкин Максим Юрьевич – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: maksim98849@gmail.com

Усанов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», Филиал Белорецк, E-mail: barracuda_m@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INCREASING THE RIGIDITY OF OVERHEAD TRANSMISSION LINE WIRES

Kharitonov Veniamin A. – Ph.D. (Eng.), Professor, Department of material processing technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hva-46@yandex.ru

Vitushkin Maxim Yu. – graduate student, Department of material processing technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: maksim98849@gmail.com

Usanov Mikhail Yu. – Cand. Eng., Associate Professor, Department of metallurgy and standardization, Nosov Magnitogorsk State Technical University – Branch in Beloretsk, Russia. E-mail: barracuda_m@mail.ru

Abstract. Overhead line wires are subject to static and dynamic loads. The stiffness of wires has a great influence on their performance. The most effective way to increase the stiffness of a wire is to increase the strength of the steel wire. According to Russian standards the requirement for the minimum tensile strength of galvanised steel wire ranges from 1380 N/mm² to 1450 N/mm² depending on the wire diameter. Overseas, similar wires are manufactured with higher tensile properties: the tensile strength of European-made wire can be between 1900 N/mm² and 2300 N/mm². This paper identifies the main ways of increasing the strength of galvanised wire on the finished size and considers their methods of implementation and disadvantages. These methods include: increasing the mass fraction of carbon in steel, obtaining a fine structure in patenting, increasing the degree of deformation in drawing, reducing the temperature of galvanizing and holding time in the galvanizing bath, alloying with silicon or vanadium. A major influence on quality parameters such as strength and ductility of the wire, as well as the costs of wire production, has a significant influence on the used drawing route. An example of a process for producing high-strength galvanised wire for wire cores is given. The use of high-carbon steel, patenting, low-temperature galvanising and a new multiple drawing route with a total degree of deformation in the range of 80-85% provides a 1.2-1.3 times increase in the stiffness of power line wires.

Keywords: power wires, stiffness, steel wire, composition, technology, competitiveness

Ссылка на статью:

Харитонов В.А., Витушкин М.Ю., Усанов М.Ю. Повышение жесткости проводов воздушных линий электропередач // Теория и технология металлургического производства. 2021. №3(38). С. 17-23.

Kharitonov V.A., Vitushkin M.Yu., Usanov M.Yu. Increasing the rigidity of overhead transmission line wires. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 38, no. 3, pp. 17-23.