RZECZPOSPOLITA POLSKA

Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **238134**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **415219**

(22) Data zgłoszenia: **11.12.2015**

(51) Int.Cl.
B21F 7/00 (2006.01)
D07B 1/08 (2006.01)
D07B 3/06 (2006.01)

(54) **Sposób skręcania przewodów wielodrutowych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
19.06.2017 BUP 13/17

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
12.07.2021 WUP 15/21

(73) Uprawniony z patentu:
TELE-FONIKA KABLE SPÓŁKA AKCYJNA, Kraków, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
TADEUSZ KNYCH, Kraków, PL
ANDRZEJ MAMALA, Kraków, PL
BEATA SMYRAK, Bulowice, PL
ARTUR KAWECKI, Kraków, PL
PAWEŁ KWAŚNIEWSKI, Kraków, PL
MICHAŁ JABŁOŃSKI, Tarnobrzeg, PL
GRZEGORZ KIESIEWICZ, Kraków, PL
PIOTR MIREK, Myślenice, PL
JAKUB SIEMIŃSKI, Wieliczka, PL
MARIUSZ TOKARSKI, Kraków, PL
MAREK KACZKOWSKI, Kraków, PL
DARIUSZ KORBUT, Śledziejowice, PL
JANUSZ MĄCZEK, Kraków, PL
ROBERT KULMA, Kraków, PL
SŁAWOMIR DZIADKOWIEC, Krzeczów, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Anna Górska

PL 238134 B1

Opis wynalazku

Wynalazek dotyczy sposobu skręcania przewodów wielodrutowych do elektroenergetycznych linii napowietrznych z jedną lub więcej warstw drutów o przekroju segmentowym, w szczególności drutów w stanie miękkim bez umocnienia odkształceniowego lub utwardzania wydzieleniowego.

Do przesyłu energii elektrycznej w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wykorzystuje się przewody wielodrutowe. Druty w tych przewodach ułożone są w warstwach i są skręcane współosiowo na drucie centralnym w taki sposób, że osie drutów tworzą w przestrzeni linie opisywane matematycznie równaniem helisy. Wielkość skrętu drutów w warstwie charakteryzuje skok skrętu. Skok skrętu to długość mierzona wzdłuż osi przewodu, na jakiej ślad osi rozpatrywanego drutu w danej warstwie obserwowany na płaszczyźnie prostopadłej do osi przewodu zatoczy pełen okrąg. Alternatywną miarą wielkości skrętu jest kąt skrętu drutu w warstwie, czyli kąt, jaki tworzy oś drutu z osią przewodu. Warstwy drutów w sąsiadujących ze sobą warstwach posiadają najczęściej przeciwne kierunki skrętu. Przewody wykonane mogą być z drutów o przekroju okrągłym lub z drutów o przekroju innym niż okrągły – najczęściej o przekroju poprzecznym segmentowym (pod pojęciem przekroju poprzecznego segmentowego rozumie się kształt przekroju poprzecznego zbliżony do wycinka pierścienia). W jednym przewodzie skręcone mogą być druty wytworzone z różnych materiałów, przy czym najczęściej w jednej warstwie skręcane są druty z tego samego materiału.

Znany jest sposób skręcania drutów o przekroju innym niż okrągły do postaci przewodu wielodrutowego opisany amerykańskim zgłoszeniu patentowym US 1,818,845. W tym dokumencie opisano sposób skręcania drutów na skręcarce wyposażonej obok układu szpul z drutami i kalibra w odpowiednie płyty dystansowe z układami prowadzącymi druty. Płyty te posiadają swobodę regulacji na kierunku osi skręcanego przewodu, jak również na kierunku obwodowym i umożliwiają wprowadzanie drutów o przekroju innym niż okrągły do kalibra pod kątem większym niż kąt wynikający ze skrętu drutów w warstwie.

Z innego amerykańskiego zgłoszenia patentowego US 2,156,652 znany jest sposób skręcania przewodów z równoczesnym formowaniem drutów o przekroju innym niż okrągły w skręcarce wyposażonej w dwuczęściową głowicę. Pierwsza część głowicy – zawierająca pary rolek prowadzących – uniemożliwia obrót drutów wokół własnej osi w płaszczyźnie pierwszej części głowicy natomiast druga cześć głowicy stanowi rodzaj tulei o stożkowej powierzchni zewnętrznej, przez wnętrze której wprowadzany jest do kalibra drut centralny lub warstwy skręcone wcześniej. Druga część głowicy znajduje się możliwie blisko kalibra i stanowi wewnętrzną stożkową powierzchnię podparcia drutów, a kaliber zewnętrzną powierzchnię podparcia tych drutów, co zapobiega możliwości obracania się drutów wokół własnej osi tuż przed wejściem do kalibra. Obie części głowicy mogą stanowić kotlinę odkształcenia plastycznego drutów i prowadzić do przekształcenia ich przekroju od przekroju początkowego okrągłego do sektorowego.

Z kolejnego amerykańskiego zgłoszenia patentowego US 3,142,145 znany jest sposób skręcania drutów o przekroju innym niż okrągły do postaci przewodu wielodrutowego poprzez umieszczenie pomiędzy szpulami a kalibrem specjalnej głowicy wyposażonej w pary rolek prowadzących drut i zapobiegających możliwości jego przekręcania w płaszczyźnie głowicy. Pary rolek prowadzących umieszczone są na tarczach zębatych, a te mogą podlegać obrotowi wokół osi drutów w sposób zapewniający identyczny kąt obrotu każdej z tarcz zębatych. Tym sposobem poprzez regulację położenia głowicy względem kalibra oraz skoku skrętu i właściwe skręcenie tarcz zębatych można uzyskać najkorzystniejszy stan ułożenia drutów na wejściu do kalibra.

Z patentu US 7,322,220 znany jest sposób skręcania przewodów z równoczesnym formowaniem drutów o przekroju innym niż okrągły w skręcarce wyposażonej w głowicę prowadząco-formującą, w której drut przechodzi przez układ rolek prowadząco-formujących z jednej strony przekształcający początkowy okrągły przekrój poprzeczny do kształtu trapezoidalnego, a z drugiej spełniający rolę prowadzenia drutu przed wejściem do kalibra.

Z europejskiego opisu zgłoszeniowego EP 0148447 znany jest sposób skręcania przewodów z drutów o przekroju innym niż kołowy znamienny zastosowaniem dodatkowej operacji odprężenia.

W ogólności proces skręcania przewodów elektroenergetycznych może być prowadzony na skręcarkach różnego typu. Skręcarki można podzielić na dwie grupy: skręcarki z odkrętem i skręcarki bez odkrętu. Istota różnicy między grupami skręcarek tkwi w składowej skręcającej drut podczas jego przejścia od szpuli do kalibra. Skręcarki z odkrętem, np. skręcarki planetarne (ang. planetary stranders), i skręcarki cygarowe (ang. tubular stranders), zapewniają takie prowadzenie drutu, że nie podlega on podczas fabrykacji przewodu skręcaniu wokół własnej osi. Z kolei skręcarki bez odkrętu, np. skręcarki koszowe (ang. ridgid stranders), powodują skręcanie się drutu wokół własnej osi przed jego wejściem

do kalibra. Wynika to z faktu, że w skręcarkach koszowych szpule z drutami umieszczone w koszach skręcarki posiadają swobodę ruchu wokół osi szpuli, co umożliwia rozwijanie drutu, ale równocześnie druty nie posiadają swobody ruchu wokół własnej osi, co skutkuje ich skręceniem, gdy kosze jako całość wykonują ruch obrotowy. Wartość skręcenia drutu wokół własnej osi zależy od wielkości skoku skrętu warstwy drutów w przewodzie oraz od budowy skręcarki i ułożenia elementów prowadzących drut w skręcarce oraz odległości kalibra od kosza bądź elementów prowadzących drut.

Podczas fabrykacji przewodów napowietrznych na skręcarkach koszowych druty podlegają odkształceniom w wyniku rozciągania pochodzącego od siły hamowania szpul, odkształceniom w wyniku skręcania wynikającego z braku swobody ruchu na kierunku obwodowym drutu oraz odkształceniom w wyniku zginania wynikającego ze zmiany krzywizn drutu podczas jego ruchu w skręcarce. Omawiane odkształcenia mogą mieć dwie składowe sprężystą i plastyczną, a ich wartości zależą od właściwości mechanicznych drutu, budowy elementów skręcarki, czy parametrów skręcanego przewodu. Im wyższa wartość granicy plastyczności i im niższy moduł sprężystości materiału drutu, tym wyższa jest wartość odkształceń sprężystych drutu obserwowanych podczas procesu skręcania na skręcarce koszowej. O ile moduł sprężystości materiału zależy istotnie, z inżynierskiego punktu widzenia, głównie od jego składu chemicznego, o tyle granica plastyczności materiału zależy od składu chemicznego i stanu materiału.

Istnieje możliwość podwyższenia granicy plastyczności materiału poprzez poddanie materiału umocnieniu odkształceniowemu, utwardzaniu wydzieleniowemu lub kombinacji obu sposobów.

Wynalazek dotyczy sposobu skręcania przewodów wielodrutowych do elektroenergetycznych linii napowietrznych z drutów o przekroju segmentowym, zwłaszcza drutów w stanie miękkim bez umocnienia odkształceniowego lub utwardzania wydzieleniowego. Celem wynalazku jest opracowanie nowego sposobu skręcania przewodów wielodrutowych, zwłaszcza na skręcarkach koszowych z kontrolowanym poziomem odkształceń wynikających ze zginania drutu o przekroju poprzecznym segmentowym.

Istota sposobu skręcania przewodów wielodrutowych według wynalazku polega na tym, że drut o przekroju segmentowym poddawany jest czterem cyklom zginania, początkowo w pierwszym cyklu zginania drut podlega rozwinięciu ze szpuli do uzyskania przez oś drutu linii prostej, po czym w drugim cyklu zginania drut podawany jest na układ trzech rolek, a następnie w trzecim cyklu następuje opasanie drutu na trzeciej rolce, po czym w kolejnym czwartym cyklu drut podawany jest na kaliber.

Korzystnie promień krzywizny tworzącej kalibra jest identyczny z promieniem rolek prowadzących.

Korzystnie w drugim cyklu zginania drut podawany jest na układ trzech rolek o promieniu 12–17 mm, których osie oddalone są względem siebie o 90–110 mm, a różnica w wysokości osi obrotu rolek względem osi przewodu wynosi 8,4–8,8 mm.

Korzystnie kąt opasania drutu na trzeciej rolce wynosi $\pi/6$ rad.

Sposób skręcania przewodów wielodrutowych do elektroenergetycznych linii napowietrznych według wynalazku polega na tym, że w trakcie skręcania kontrolowany jest poziom odkształceń wynikających ze zginania drutu w poszczególnych cyklach zginania, a mianowicie w kolejnych czterech cyklach zginania części przekroju poprzecznego drutu położone powyżej i poniżej płaszczyzny obojętnej podlegają naprzemiennie odkształceniom dodatnim i ujemnym, a odkształcenia w cyklu pierwszym i drugim oraz trzecim i czwartym w poszczególnych obszarach materiału drutu są zbliżone co do wartości lecz przeciwnego znaku.

Cel wynalazku osiągnięto poprzez zastosowanie w skręcarce specjalnego układu rolek o określonej średnicy prowadzących drut ułożonych odpowiednio w przestrzeni i skojarzonych z kalibrem o określonej krzywiźnie krawędzi roboczej. Sposób skręcania według wynalazku zostanie bliżej objaśniony na podstawie przykładu realizacji przedstawionego na rysunkach, na których fig. 1 przedstawia najważniejsze wielkości kwantyfikujące wymiary drutu o przekroju poprzecznym segmentowym, a fig. 2 widok przekroju poprzecznego przewodu do elektroenergetycznych linii napowietrznych z warstwą skręconą z drutów o przekroju segmentowym. Fig. 3 przedstawia ogólny schemat skręcania przewodów z drutów o przekroju segmentowym, a fig. 4 przedstawia rozkład odkształceń gnących i naprężeń w drucie o przekroju okrągłym z ukazaniem strefy odkształceń gnących sprężystych i strefy występowania odkształceń gnących plastycznych dla materiału o niskiej i wysokiej granicy plastyczności (tj. dla materiału w stanie miękkim i materiału poddanego umocnieniu odkształceniowemu i/lub utwardzaniu wydzieleniowemu), a fig. 5 przedstawia rozkład odkształceń gnących i rozciągających drut o przekroju poprzecznym segmentowym oraz rozkład naprężeń. Fig. 6 ukazuje ideowo wyjściowy kształt drutu o przekroju poprzecznym segmentowym (linia ciągła) oraz kształt drutu segmentowego po deformacji

wskutek występowania odkształceń wynikających ze zginania. Przekrój poprzeczny drutu segmentowego (fig. 1) wykorzystanego do skręcania warstwy przewodu (fig. 2) oszacować można z dobrym przybliżeniem (przy zaniechaniu promieni zaokrągleń krawędzi), jako pole przekroju trapezu opartego o punkty A–B–C–D pomniejszonego o odcinek koła o promieniu wewnętrznym (Rw) ograniczony cięciwą opartą na punktach A i B oraz powiększonego o odcinek koła o promieniu zewnętrznym (Rz) ograniczony cięciwą opartą na punktach C i D. Kąt rozwarcia ramion trapezu opartego na punktach A–B–C–D (ω) wynika z podziału pierścienia na odpowiednią dla danej warstwy ilość segmentów i skrętu drutów w tej warstwie. Z zależności geometrycznych ukazanych na fig. 1 wyznaczać można pole przekroju poprzecznego drutu segmentowego wg wzoru:

$$S = \frac{Rz^2 - Rw^2}{2}\omega$$

Podczas skręcania warstwy przewodu (3) z drutów o przekroju poprzecznym segmentowym (1), jak na fig. 3, druty (1) (na fig. 3 uwidoczniono jedynie 2 druty warstwy) o rozpatrywanym przekroju nawinięte są na szpulach (6) (na fig. 3 uwidoczniono jedynie 2 szpule) mocowanych w koszu skręcarki (nie uwidocznionym na fig. 3) skąd są rozwijane i podawane na zespół rolek (4a, 4b, 4c), a następnie opasują rolki (4c) i przechodzą do kalibra (5). Równocześnie ośrodek przewodu (2) przemieszcza się przez maszynę wzdłuż linii prostej i przechodzi do kalibra (5) wewnątrz pierścienia utworzonego przez druty o przekroju poprzecznym segmentowym (1). Wskutek obrotu kosza skręcarki i przemieszczenia drutów (1) i ośrodka (2) w kalibrze powstaje przewód (3).

Podczas skręcania na odcinku od szpuli do kalibra drut (1) podlega odkształceniu wynikającemu z osiowego rozciągania, zginania, a w przypadku skręcarki bez odkrętu również skręcania. Odkształcenia wynikające z osiowego rozciągania drutu są limitowane siłami hamowania szpul z drutami w skręcarce. Są one stosunkowo niewielkie (odkształcenia te są odkształceniami sprężystymi) i co ważne równomierne na całym przekroju drutu. Odkształcenia wynikające ze skręcania (w skręcarkach bez odkrętu) są nierównomierne na przekroju poprzecznym drutu i są proporcjonalne do odległości od osi obojętnej. Odkształcenia (obserwowane wzdłuż osi drutu) wynikające ze zginania zależą od charakteru prowadzenia drutów w skręcarce i są funkcją zmian krzywizny drutu od początkowej krzywizny drutu na szpuli (Rs) do finalnej krzywizny drutu w przewodzie. Odkształcenia te są mocno zróżnicowane na przekroju drutu i są proporcjonalne do odległości rozpatrywanego punktu przekroju poprzecznego od płaszczyzny obojętnej dla gięcia (7). Wartość odkształceń (obserwowanych wzdłuż osi drutu) wynikających ze zginania oszacować można z ogólnie znanej zależności:

$$\varepsilon g = \frac{o - x}{R}$$

Cechą charakterystyczną drutów o przekroju poprzecznym okrągłym jest fakt, że sztywność na zginanie takiego drutu jest identyczna na wszystkich kierunkach promieniowych. Fig. 4 ukazuje przypadek czystego zginania drutów o przekroju poprzecznym okrągłym, w którym oś obojętna dla gięcia (7) przechodzi przez środek drutu w miejscu (o), a ekstremalne odkształcenia (εg) pochodzące od zginania występujące przy powierzchni są identyczne dla odpowiedniej części przekroju, w której występuje ściskanie (-) jak i dla części przekroju, w której występuje rozciąganie (+). Jeśli poziom odkształceń pochodzących od zginania będzie odpowiednio duży odkształcenia te będą odkształceniami plastycznymi. Z tego powodu podczas zginania cześć przekroju poprzecznego drutu zlokalizowana w okolicach płaszczyzny obojętnej będzie odkształcona jedynie sprężyście (s) natomiast część będzie odkształcona plastycznie (s/p). Część przekroju poprzecznego, w którym występują odkształcenia sprężyste będzie większa w przypadku drutów po umocnieniu odkształceniowym lub utwardzaniu wydzieleniowym niż w przypadku drutów w stanie miękkim. Odkształcenie materiału poprzez działanie sił zewnętrznych generuje w materiale odpowiedni stan naprężenia (δ). Występowanie deformacji przekroju poprzecznego drutów okrągłych podczas skręcania przewodów nie jest istotnym mankamentem technicznym, ponieważ między drutami w warstwie występują niewielkie szczeliny, a powstały w wyniku deformacji przez gięcie przekrój poprzeczny drutu zbliżony jest finalnie do elipsy. Deformacja taka jest maskowana poprzez skręcenie plastyczne drutów wokół własnej osi.

O ile plastyczne skręcenie wokół osi drutów o przekroju okrągłym nie ma znaczenia z uwagi na ich kołową symetrię, to druty o przekroju poprzecznym segmentowym tworząc warstwę przewodu muszą być właściwie ulokowane w przestrzeni, tak aby wklęsła część konturu drutów stykała się z ośrodkiem, a wypukła cześć konturu drutów tworzyła kołowy obrys zewnętrzny warstwy (fig. 2). W związku

z tym druty o przekroju poprzecznym segmentowym muszą być odpowiednio prowadzone w skręcarce, tak aby zapewnić ich właściwie ułożenie na wejściu do kalibra, tj. powierzchnią wypukłą do kalibra. Niekontrolowane skręcenie drutów lub deformacja ich przekroju poprzecznego uniemożliwia uzyskanie warstwy przewodu.

W przypadku czystego zginania drutów o przekroju poprzecznym segmentowym ukazanego na fig. 5 płaszczyzna obojętna nie lokuje się w połowie grubości drutu lecz jest zbliżona ku wypukłej powierzchni drutu. Jest to limitowane faktem, że płaszczyzna obojętna dla gięcia przechodzi przez środek ciężkości przekroju. Odległość o płaszczyzny obojętnej od dolnej krawędzi drutu o przekroju poprzecznym segmentowym opisana jest zależnością:

$$o = \left(\sqrt{\frac{\omega\left(Rz^2 + Rw^2\right)}{2\sin\omega}} - Rw \right) \cos\frac{\omega}{2}$$

Niesymetryczne na grubości drutu o przekroju poprzecznym segmentowym położenie płaszczyzny obojętnej powoduje, że ekstremalne odkształcenia pochodzące od zginania w częściach przekroju znajdujących się poniżej i powyżej płaszczyzny obojętnej są różne. W procesie skręcania przewodu położenie płaszczyzny obojętnej może ulec niewielkiemu przesunięciu (Δo) wskutek występowania odkształceń wzdłużnych (εr) pochodzących od sił naciągu w drutach wywoływanych przez hamowanie szpul. Ponadto odkształcenia pochodzące od zginania w dominującej części przekroju poprzecznego są odkształceniami plastycznymi. Odkształcenia te rosną liniowo w miarę oddalania się od osi obojętnej. Wobec prawa stałości objętości odkształcenia trwałe wystąpią nie tylko na kierunku osi drutów (jak ukazano to na fig. 4 i fig. 5), ale również na kierunkach prostopadłych. W efekcie trwałej zmianie ulegnie wysokość drutu, krzywizny powierzchni wklęsłej i wypukłej, jak również kształt ścianek bocznych drutu, co ukazuje fig. 6.

Wskazana jest minimalizacja możliwych deformacji trwałych przekroju poprzecznego drutu o przekroju segmentowym. Zmiana kształtu drutu o przekroju segmentowym generuje nierównomierne przyleganie drutów w ramach warstwy i między warstwami do siebie pod naciągiem. Skutkuje to zmniejszeniem odporności na fretting przewodu decydującej o odporności przewodu na drgania wiatrowe i zmniejszeniem promieniowej przewodności cieplnej przewodu decydującej o rozkładzie temperatury na średnicy przewodu podczas przepływu prądu.

Nieoczekiwanie okazało się, że korzystną minimalizację możliwych deformacji trwałych przekroju poprzecznego drutu podczas skręcania można osiągnąć poprzez poddanie drutu cyklom naprzemiennego przeginania z kontrolowanym poziomem odkształceń wynikających ze zginania – to jest przeginania w celu zmiany krzywizny drutu o możliwie podobną wartość lecz w przeciwnych kierunkach zginania.

Jak ukazano na fig. 3 drut o przekroju poprzecznym segmentowym (1) nawinięty na szpulę (6) i poddany rekrystalizacji w celu uzyskania stanu miękkiego jest wolny w stanie wyjściowym od naprężeń wewnętrznych. Drut taki na szpuli ze średnią krzywizną początkową (Rs) po rozwinięciu staje się prosty. Jeśli drut o przekroju poprzecznym segmentowym został nawinięty na szpulę powierzchnią wypukłą do wnętrza szpuli to ekstremalne odkształcenia gnące w drucie (1) po rozprostowaniu wynoszą odpowiednio (wraz z ukazaniem znaku w nawiasie), w przypadku gdy Rs >> h:

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wypukłej powyżej płaszczyzny obojętnej (fig. 5):

$$\varepsilon g(+) \approx \frac{h - o + \Delta o}{Rs}$$

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wklęsłej poniżej płaszczyzny obojętnej (fig. 5):

$$\varepsilon g(-) \approx \frac{o - \Delta o}{Rs}$$

W dalszej kolejności drut (1) przechodzi przez układ trzech rolek prowadzących (4a, 4b, 4c) i przyjmuje przechodząc między nimi krzywiznę (R). W odniesieniu do stanu prostoliniowego odkształcenia ekstremalne wynoszą odpowiednio (wraz z ukazaniem znaku w nawiasie):

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wypukłej powyżej płaszczyzny obojętnej:

$$\varepsilon g(-) \approx \frac{h - o + \Delta o}{R}$$

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wypukłej poniżej płaszczyzny obojętnej:

$$\varepsilon g(+) \approx \frac{o - \Delta o}{R}$$

przy czym:

$$R \approx \frac{\delta}{2} + \frac{L^2}{8\delta}$$

po ustawieniu położenia rolek prowadzących w taki sposób, że:

$$R \approx Rs$$

poszczególne punkty na przekroju poprzecznym drutu podczas prostowania za szpulą i zginania między rolkami prowadzącymi uzyskują w przybliżeniu identyczne odkształcenia (na kierunku osi drutu), ale o przeciwnym znaku. Wskutek tego deformacje plastyczne przekroju poprzecznego drutu w znaczącym stopniu znoszą się wzajemnie.

Odkształcenia na większej części przekroju mają składową sprężystą i plastyczną (s/p). Wskutek zmian granicy plastyczności indukowanej przez odkształcenie przy zginaniu drutu między rolkami składowa sprężysta odkształcenia będzie większa niż w przypadku zmiany krzywizny drutu od krzywizny szpuli do linii prostej. W praktycznych przypadkach procesu skręcania zakres występowania (s) i poziom odkształceń sprężystych drutu w stanie miękkim jest zaniedbywalnie mały.

Po zetknięciu się drutu (1) z rolką prowadząca (4c) drut opasa rolkę (4c) na pewnej części obwodu (optymalny kąt opasania (α): $\pi/6$ radiana). W efekcie drut przyjmuje krzywiznę bliską krzywiźnie rolki (Rr). Wskutek tego – w porównaniu do stanu przed kontaktem z rolką (4c) – ekstremalne odkształcenia gnące w drucie (1) wynoszą odpowiednio w odniesieniu do stanu prostoliniowego (wraz z ukazaniem znaku w nawiasie):

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wypukłej powyżej płaszczyzny obojętnej:

$$\varepsilon g(+) \approx \frac{o - \Delta o}{Rr + o}$$

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wklęsłej poniżej płaszczyzny obojętnej:

$$\varepsilon g(-) \approx \frac{h - o + \Delta o}{Rr + o}$$

Z rolki (4c) drut trafia do kalibra gdzie jest zginany wzdłuż tworzącej krzywizny kalibra (Rk). Ekstremalne odkształcenia gnące w drucie (1) wynoszą odpowiednio w odniesieniu do drutu prostoliniowego (wraz z ukazaniem znaku w nawiasie):

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wypukłej powyżej płaszczyzny obojętnej:

$$\varepsilon g(-) \approx \frac{o - \Delta o}{Rk + h - o}$$

dla najdalej oddalonego punktu krawędzi wklęsłej poniżej płaszczyzny obojętnej:

$$\varepsilon g(+) \approx \frac{h - o + \Delta o}{Rk + h - o}$$

Po dobraniu promienia krzywizny (Rk) kalibra (5) do promienia (Rr) rolek (4c) i wymiarów (h, o) drutu (1) w taki sposób, że:

$$Rk + h - o \approx Rr + o$$

deformacje plastyczne przekroju poprzecznego drutu w znaczącym stopniu znoszą się wzajemnie.

P r z y k ł a d

Skręcanie warstwy zewnętrznej przewodu ACSS Hawk / TW (przewód do elektroenergetycznych linii napowietrznych z warstwą zewnętrzną wykonaną z 11 drutów segmentowych z miękkiego aluminium) wg normy ASTM B857. Parametry materiałowe drutu, parametry geometryczne warstwy przewodu, najważniejsze wymiary przekroju poprzecznego drutu o przekroju segmentowym, kluczowe dla realizacji procesu skręcania krzywizny szpuli, rolek oraz kalibra, a także oszacowane odkształcenia ekstremalne przedstawiono w tabeli poniżej. W końcowych wierszach tabeli zamieszczono wyniki oceny kształtu drutu po skręcaniu i wyniki odsprężynowania warstwy przewodu.

wielkość / parametr	**symbol / szczegóły**	**wartość**
rodzaj przewodu	-	ACSS HAWK /TW
materiał drutu	-	EN AW 1350
stan materiału	-	miękki (zrekrystalizowany
wytrzymałość na rozciągnie drutu przed skręcaniem	-	65MPa
umowna granica plastyczności drutu przed skręcaniem	-	41MPa
wydłużenie przy zerwaniu w próbie jednoosiowego rozciągania	-	37%

wielkość / parametr	symbol / szczegóły	wartość
moduł Younga	-	86GPa
numer warstwy	-	III - zewnętrzna
ilość drutów segmentowych w warstwie	-	11 szt.
promień wewnętrzny warstwy skręcanej (promień zewnętrzny ośrodka)	Rw	7mm
promień zewnętrzny warstwy skręcanej (promień zewnętrzny przewodu)	Rz	10mm
grubość pierścienia reprezentującego warstwę skręcaną (różnica promienia zewnętrznego i wewnętrznego warstwy skręcanej)	g	3mm
wysokość drutu o przekroju poprzecznym segmentowym	h	3,27mm
kąt rozwarcia ramion trapezu opartego na punktach A-B-C-D, tj krawędzi bocznych drutu o przekroju poprzecznym segmentowym	ω	0,559 rad
przekrój poprzeczny drutu	S	14,24mm2
odległość płaszczyzny obojętnej dla gięcia od krawędzi drutu	o	1,79mm
średni promień szpuli (promień szpuli z nawiniętym drutem o długości połowy długości znamionowej)	Rs	150mm
sposób nawinięcia drutu na szpuli	-	krawędzią wypukłą drutu do środka szpuli
promień rolki prowadzącej	Rr	15mm
promień krzywizny drutu między rolkami głowicy	R	150mm
odległość między osiami rolek zewnętrznych	L	100mm
strzałka ugięcia drutu miedzy rolkami	Δ	8,6mm
promień krzywizny kalibra	Rk	15mm
naciąg osiowy wynikający z hamowania szpul	-	150N
odkształcenie pochodzące od rozciągania na kierunku osi drutu (hamowanie szpul)	εr	0,016%
przesunięcie położenia płaszczyzny obojętnej	Δo	zaniedbywalnie małe
kąt opasania drutem rolki prowadzącej (4c)	A	π/6 rad.

wielkość / parametr	symbol / szczegóły	wartość
ekstremalne odkształcenia gnące w pierwszym cyklu (prostowanie drutu z krzywizny na szpuli do linii prostej)	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wypukłej	+1%
	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wklęsłej	-1,2%
zakres występowania odkształceń sprężystych wokół płaszczyzny obojętnej	s	0,18mm
ekstremalne odkształcenia gnące w drugim cyklu (zginanie między rolkami prowadzącymi)	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wypukłej	-1%
	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wklęsłej	+1,2%
ekstremalne odkształcenia gnące w trzecim cyklu (zginanie między rolkami prowadzącymi)	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wypukłej	11%
	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wklęsłej	-8,8%
ekstremalne odkształcenia gnące w czwartym cyklu (zginanie między rolkami prowadzącymi)	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wypukłej	-11%
	najdalej oddalony od osi obojętnej punkt krawędzi wklęsłej	+8,8%
zaobserwowana deformacja kształtu (proporcji i kąta rozwarcia krawędzi bocznych) przekroju poprzecznego drutu segmentowego po skręcaniu	-	poniżej 1%
zaobserwowane odsprężynowanie drutów warstwy po skręcaniu	-	poniżej 0,02mm

Wykaz oznaczeń

1	drut o przekroju poprzecznym segmentowym
1a	drut o przekroju poprzecznym okrągłym
2	ośrodek przewodu (tj. warstwy skręcone we wcześniejszych operacjach) lub drut centralny)
3	przewód po skręcaniu
4a, 4c	zewnętrzne rolki prowadzące
4b	wewnętrzna rolka prowadząca
5	kaliber
6	szpula z drutem
7	ślad płaszczyzny obojętnej dla gięcia
A, B, C, D	wierzchołki trapezu przekroju poprzecznego drutu profilowego
L	odległość między osiami rolek zewnętrznych
L/2	połowa odległości między osiami rolek zewnętrznych – odległość miedzy osią rolki zewnętrznej i rolki wewnętrznej
R	promień krzywizny drutu między rolkami głowicy

Rk promień krzywizny kalibra
Rr promień rolki głowicy
Rs średni promień szpuli (promień szpuli z nawiniętym drutem o długości równej połowie długości znamionowej)
Rw promień wewnętrzny warstwy skręcanej (promień zewnętrzny ośrodka)
Rz promień zewnętrzny warstwy skręcanej
X odległość od krawędzi drutu
G grubość pierścienia reprezentującego warstwę skręcaną (różnica promienia zewnętrznego i wewnętrznego warstwy skręcanej)
H wysokość drutu o przekroju poprzecznym segmentowym
O odległość płaszczyzny obojętnej dla gięcia od krawędzi drutu
S obszar występowania odkształceń sprężystych
s/p obszar występowania odkształceń plastycznych
A kąt opasania drutu na rolce
Δ strzałka ugięcia drutu między rolkami
Δo przesunięcie śladu płaszczyzny obojętnej dla gięcia wskutek występowania siły osiowej rozciągającej drut
Eg odkształcenie pochodzące od zginania obserwowane na kierunku osi drutu
Er odkształcenie pochodzące od rozciągania na kierunku osi drutu obserwowane na kierunku osi drutu
E odkształcenie sumaryczne (od zgnania i rozciągania)
Σ naprężenie
Ω kąt rozwarcia ramion trapezu opartego na punktach A–B–C–D, tj. krawędzi bocznych drutu o przekroju poprzecznym segmentowym
+ znak odkształcenia, odkształcenia dodatnie
- znak odkształcenia, odkształcenie ujemne

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób skręcania przewodów wielodrutowych z co najmniej jedną warstwą z drutów o przekroju poprzecznym segmentowym, **znamienny tym**, że drut o przekroju segmentowym poddawany jest czterem cyklom zginania, początkowo w pierwszym cyklu zginania drut podlega rozwinięciu ze szpuli do uzyskania przez oś drutu linii prostej, po czym w drugim cyklu zginania drut podawany jest na układ trzech rolek, a następnie w trzecim cyklu następuje opasanie drutu na trzeciej rolce, po czym w kolejnym czwartym cyklu drut z trzeciej rolki podawany jest na kaliber.
2. Sposób skręcania przewodów wielodrutowych według zastrz. 1, **znamienny tym**, że promień krzywizny tworzącej kalibra jest identyczny z promieniem rolek prowadzących.
3. Sposób skręcania przewodów wielodrutowych według zastrz. 1–2, **znamienny tym**, że w drugim cyklu zginania drut podawany jest na układ trzech rolek o promieniu 12–17 mm, których osie oddalone są względem siebie o 90–110 mm, a różnica w wysokości osi obrotu rolek względem osi przewodu wynosi 8,4–8,8 mm.
4. Sposób skręcania przewodów wielodrutowych według zastrz. 1–3, **znamienny tym**, że kąt opasania drutu na trzeciej rolce wynosi $\pi/6$ rad.

Rysunki

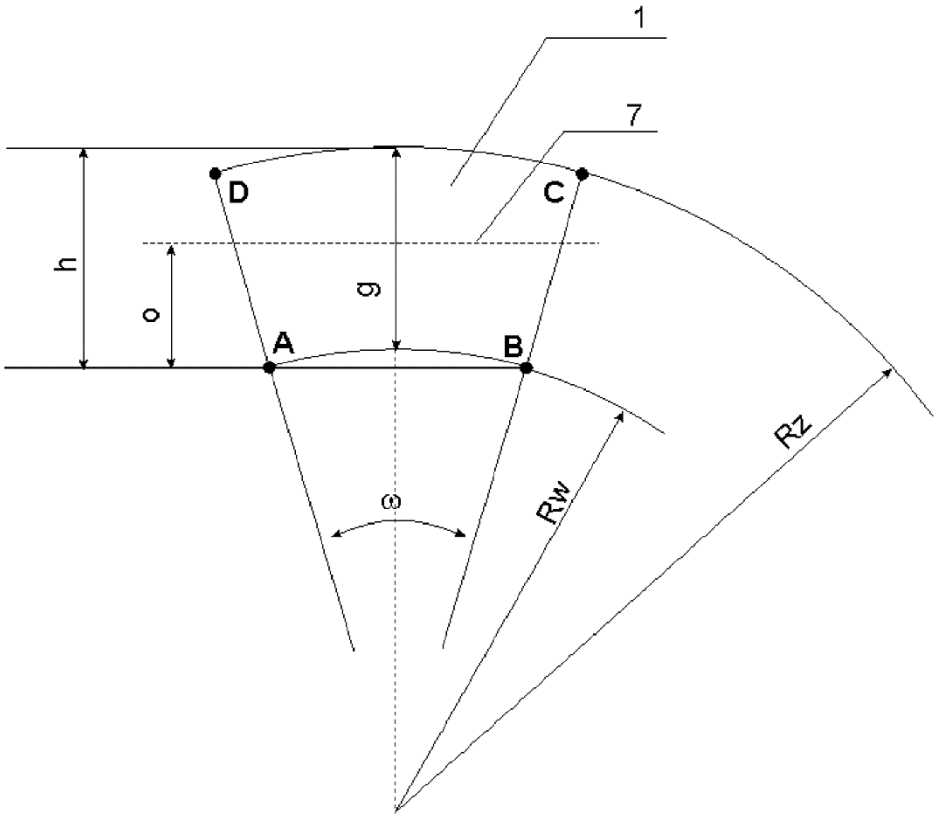

Fig. 1

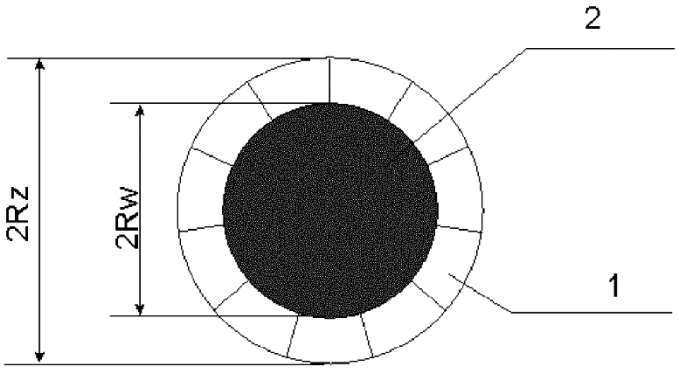

Fig. 2

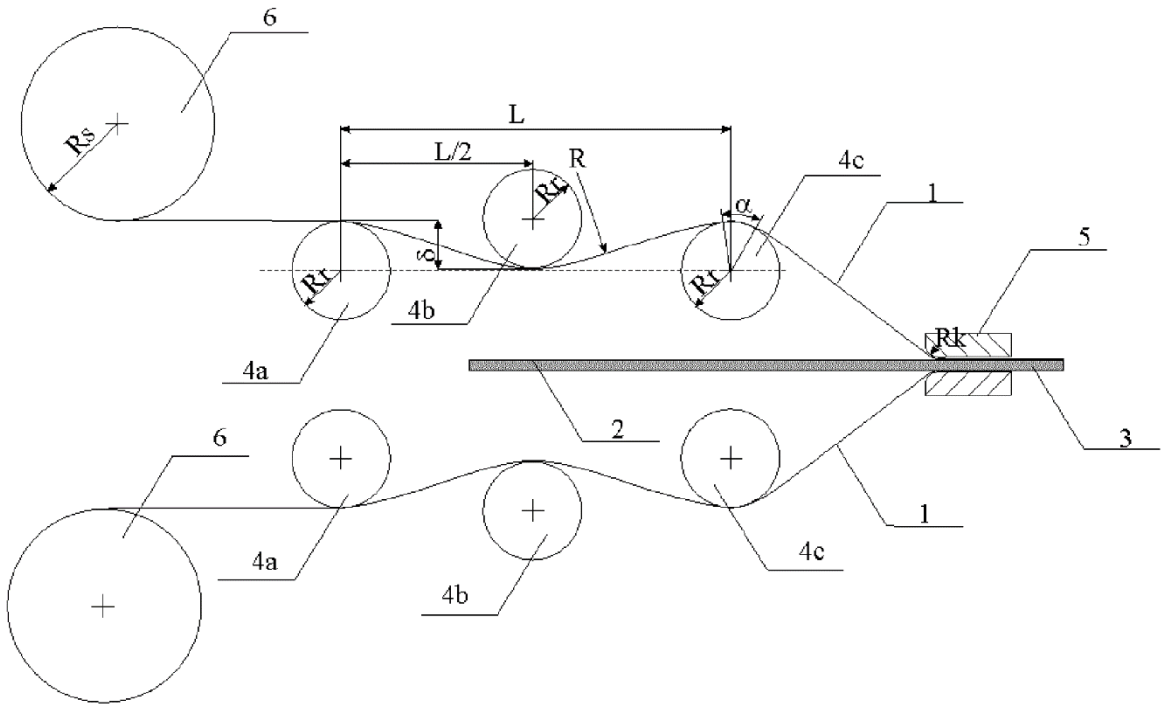
6
Rs
L
L/2
R
Rs
4c
1
α
δ
5
Rt
Rt
4b
Rk
4a
2
3
6
1
4a
4c
4b

Fig. 3

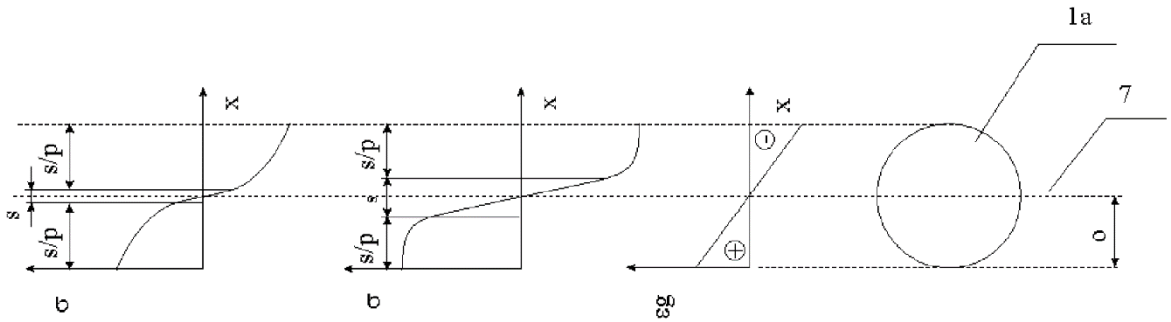
1a
7
x
x
x
s/p
s/p
s
s/p
s
s/p
σ
σ
εg
o

Fig. 4

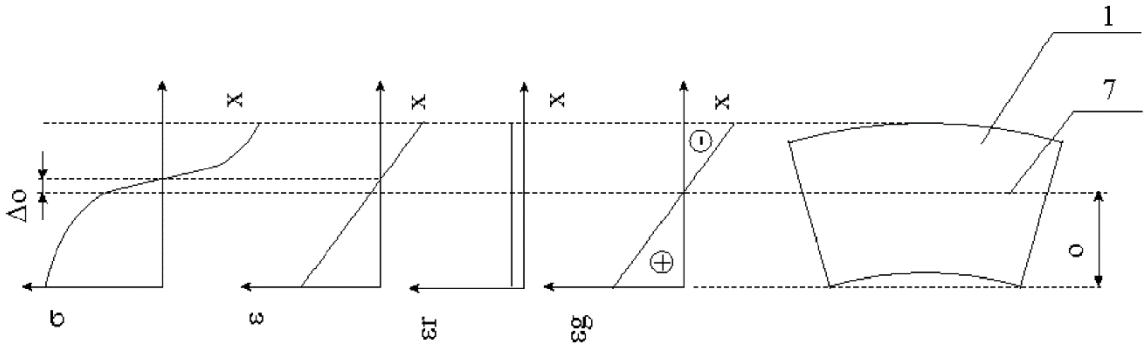

Fig. 5

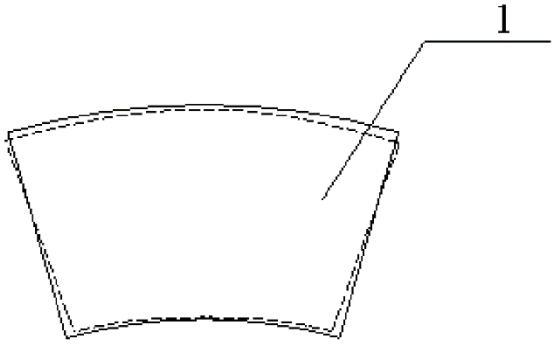

Fig. 6