

Wpływ węzłów na parametry mechaniczne lin stosowanych w sprzęcie chroniącym przed upadkiem z wysokości

Fot. silver-johny/Bigstockphoto



W indywidualnym sprzęcie chroniącym przed upadkiem z wysokości są stosowane elementy włókiennicze, do których należą głównie liny i taśmy o różnej konstrukcji, wykonane z różnych surowców. Przykładami takiego sprzętu są poziome i pionowe liny kotwiczące, urządzenia samozaciskowe z giętkimi prowadnicami, amortyzatory włókiennicze, linki bezpieczeństwa itp. Na szczególną uwagę zasługują składniki sprzętu zawierające liny włókiennicze o długości do kilkudziesięciu metrów, ze względu na ich wpływ na przebieg powstrzymywania spadania.

W przypadku sprzętu stosowanego podczas uprawiania sportu i rekreacji, ale również w warunkach przemysłowych, np. w arborystyce, użycie lin wiąże się często z wykonywaniem węzłów. Ze względu na wpływ takich konstrukcji na bezpieczeństwo ludzi, w CIOP-PIB w 2020 r. podjęto badania parametrów mechanicznych lin włókienniczych z węzłami różnych rodzajów.

W artykule zaprezentowano badania lin włókienniczych o różnej konstrukcji w zakresie zdolności zaciskania węzłów. Parametr K, wyznaczony w tych badaniach odnosi się do pewności zawiązania węzła na linie włókienniczej, tzn. uniemożliwienia samoczynnego luzowania. Przedstawiono badania dynamiczne zachowania lin włókienniczych zakończonych pętlami z trzema typami węzłów. Uzyskane wyniki pokazały, że zakończenia w postaci pętli z węzłem pochłaniają istotnie więcej energii kinetycznej niż prosty odcinek liny włókienniczej podczas powstrzymywania spadania z wysokości. Zaprezentowano również badania wpływu węzłów na siłę zrywającą lin włókienniczych. Wyniki wskazują, że pętla z węzłem może mieć siłę zrywającą, np. o 50% mniejszą niż prosty odcinek liny, na którym została utworzona.

Słowa kluczowe: węzły, liny, parametry mechaniczne, ochrona przed upadkiem z wysokości

Impact of knots on mechanical parameters of ropes used in fall arrest equipment

Textile elements, including mainly ropes and webbings of different designs, made of various raw materials, are used in personal equipment protecting against falls from a height. The examples of such equipment are horizontal and vertical anchor lines, self-locking devices on a flexible anchor lines, textile energy absorbers, lanyards, etc. Particular attention should be paid to the components of such equipment containing fibre ropes of up to several dozen meters length, due to their impact on the course of the fall arrest. In the case of equipment used in sports and recreation, but also in industrial conditions, e.g. in arboristics, the use of ropes is often associated with the formation of knots. Due to the impact of such structures on human safety, a study of the mechanical parameters of fibre ropes with knots of different types was undertaken in CIOP-PIB in 2020.

The paper presents tests of fibre ropes of different design in terms of knotability ratio. Parameter K, as determined in these tests, refers to the certainty of tying a knot on a fibre rope, i.e. the impossibility of its self-loosening. Dynamic studies of the performance of fibre ropes ending in loops with three types of knots are presented. The results showed that rope endings in the form of a loop with a knot absorb significantly more kinetic energy than a straight section of a fibre rope when arresting a fall from a height. Studies of the effect of knots on the breaking force of fibre ropes were also presented. The results indicate that the breaking force in the case of a loop with a knot can be e.g. 50% lower than that characterizing the straight section of the rope on which it was formed.

Keywords: knots, ropes, mechanical parameters, fall arrest

Wstęp

Używanie indywidualnego sprzętu chroniącego przed upadkiem z wysokości to wciąż jedna z najczęściej stosowanych metod zabezpieczania ludzi pracujących na stanowiskach usytuowanych powyżej podłoża. Z rozwiązania tego korzystają również sportowcy, a także osoby uprawiające rekreacyjną wspinaczkę wysokogórską lub skałkową. Na zespół zabezpieczający użytkownika składa się wiele kompatybilnych części, w tym elementów włókienniczych, do których należą głównie liny i taśmy. Cechujące się różną konstrukcją i wykonane z różnych surowców liny i taśmy włókiennicze są stosowane między innymi w:

- urządzeniach kotwiczących – np. poziomych i pionowych linach kotwiczących [1]
- podzespołach łącząco-amortyzujących, np. urządzeniach samozaciskowych z giętkimi prowadnicami [2], urządzeniach samohamownych [3], amortyzatorach włókienniczych [4], jako linkach bezpieczeństwa [5]
- uprzężach, np. szelkach bezpieczeństwa, pasach do ustalania pozycji podczas pracy
- sprzęcie uniemożliwiającym rozpoczęcie spadania.

Na szczególną uwagę zasługują elementy włókiennicze o dużej długości [6], to znaczy od jednego do kilkudziesięciu metrów. To od nich bowiem zależą dwie najważniejsze wielkości charakteryzujące proces powstrzymywania spadania człowieka:

- siła hamująca, która powstrzymuje spадanie
- droga, na której spадanie jest powstrzymane

Ich wartości wpływają bezpośrednio na bezpieczeństwo, ponieważ są z nimi powiązane obciążenia mechaniczne działające na człowieka, takie jak przyspieszenia i naciski. Obciążenia te mogą występować np. podczas zderzenia z obiektami znajdującymi się w obrębie stanowiska pracy i wywoływać obrażenia wewnętrzne u człowieka.

Wyniki badań parametrów mechanicznych lin i taśm włókienniczych stosowanych w sprzęcie chroniącym przed upadkiem z wysokości przedstawiono w licznych publikacjach [np. 7-11].

W niektórych przypadkach do prawidłowego korzystania z lin włókienniczych konieczne

Tabela. Liny włókiennicze poddane badaniom
Table. Tested fibre ropes

Oznaczenie	Producent / Typ liny
A	Beal / AQUALINE 9,5 mm
B	Beal / Baobab 13,5 mm
C	Mammut / 10.0 Performance Static
D	Edelrid / Static 12 mm
E	Tendon / Trust 11
F	Bezalin / PA/12/A-Z
G	Bezalin / PA/14/A-Z
H	Bezalin / PA/16/A-Z
I	Bezalin / Pes-12-A-Z
J	Bezalin / Pes-14-A-Z
K	Protekt / PES/Technora fi 11,5 mm
L	Bezalin / lina pleciona poliamidowa 12 mm
M	Moratex / lina kevlarowa 12 mm



Rys. 1. Liny włókiennicze poddane badaniom
Fig. 1. Tested fibre ropes

z węzłem, znajdująca się np. na dolnym lub górnym zakończeniu prowadnicy urządzenia samozaciskowego bądź poziomej liny kotwiczącej, musi zostać zweryfikowana w badaniach odporności na obciążenie statyczne i zachowania w warunkach powstrzymywania spadania. Weryfikacji takiej dokonuje zarówno producent, jak i jednostka notyfikowana wydająca stosowny certyfikat CE.

Drugi przypadek wiąże się z koniecznością zachowania szczególnej ostrożności, gdyż o jakości węzła decyduje sam użytkownik, który nie ma możliwości technicznych sprawdzenia wykonanego połączenia. W związku z tym jego bezpieczeństwo jest uzależnione od jego wiedzy i doświadczenia. Samodzielne wykonywanie węzłów na linach włókienniczych w sprzęcie chroniącym przed upadkiem jest dopuszczalne tylko za zgodą producenta i w sposób wskazany przez niego w instrukcji użytkowania. W przypadku sportu przeznaczanego do zastosowań sportowo-rekreacyjnych, np. do wspinaczki wysokogórskiej, niezbędne jest specjalistyczne szkolenie.

Ze względu na bezpośrednie przeżożenie tej problematyki na bezpieczeństwo ludzi, w 2020 r. w CIOP-PIB podjęto badania nad wpływem węzłów o różnej konstrukcji na parametry mechaniczne lin włókienniczych. Celem artykułu jest prezentacja uzyskanych wyników i najważniejszych wniosków w tym zakresie.

Obiekty badań

Do badań wytypowano liny włókiennicze o różnej konstrukcji, wykonane z różnych włókien sztucznych, stosowane w sprzęcie chroniącym przed upadkiem z wysokości – zarówno w warunkach przemysłowych, jak i sportowo-rekreacyjnych. Liny przedstawione na rys. 1. są wykorzystywane między innymi do produkcji linek bezpieczeństwa, prowadnic urządzeń samozaciskowych, poziomych systemów kotwiczących, statycznych i dynamicznych lin alpinistycznych oraz sprzętu do ewakuacji ludzi z wysokości. Producentów badanych

lin i ich typy przedstawiono w tabeli; każdej linie przypisano oznaczenie literowe. Pod względem konstrukcji można wyróżnić liny: skręcane (F-J), plecione (L) i rdzeniowe w oplocie (A-E, K, M). Ich średnice zawierały się w granicach od 9,5 do 16 mm. Do testów wybrano liny wykonane z różnego rodzaju włókien sztucznych: poliamidowe, poliestrowe, kevlarowe (M) i aramidowe.

Szczegółowe informacje dotyczące parametrów mechanicznych oraz konstrukcji przebadanych lin są dostępne na stronach internetowych ich producentów.

Każdą z lin badano w kilku etapach, po stworzeniu różnych pętli na jej zakończeniu. Do badań wytypowano trzy rodzaje węzłów: kluczkę (A), skrajny tatrzański (B) i ósemkę (C), które przedstawiono na rys. 2. Są to popularne węzły wykorzystywane do tworzenia zakończeń na linach alpinistycznych; ich właściwości mechaniczne oraz zastosowania omówił szerzej A. Lwow [12].

Zdolność zaciskania węzłów

Możliwość zawiązania na linie włókienniczej skutecznego i pewnego węzła, tzn. takiego, który nie będzie ulegał samoczynnemu luzowaniu podczas użytkowania liny, zależy od jej następujących parametrów: sztywności, konstrukcji i rodzaju powierzchni, a szczególnie współczynnika tarcia i rodzaju węzła. Metodę badania oraz odpowiednie wymagania służące ocenie zdolności zaciskania węzłów na linach włókienniczych sformułowano w PN-EN 1891:2002 [15]. Metoda badania polega na pomiarze średnicy prześwitu w pojedynczym węźle. Stanowisko badawcze, które było do tego wykorzystywane, przedstawiono na rys. 3. Do oceny zdolności zaciskania węzłów służy zawarty w PN-EN 1891:2002 [15] współczynnik K, zdefiniowany przez zależność:

$$K = D_w / d \quad (1)$$

gdzie: D_w – średnia wartość średnicy prześwitu w węźle,
 d – średnica liny.

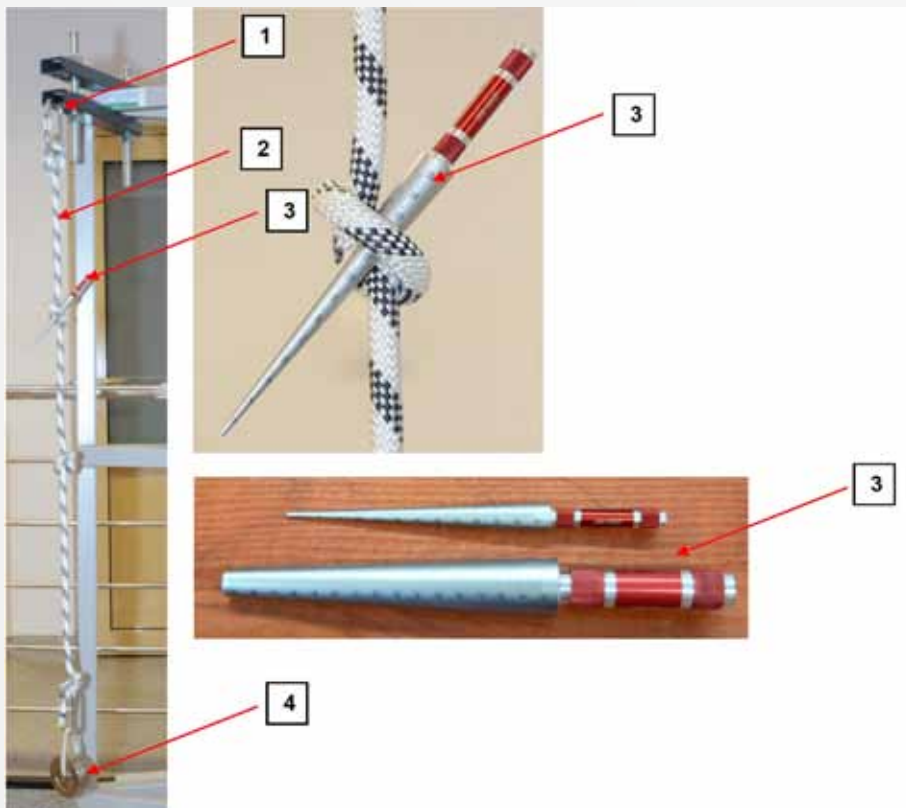


Rys. 2. Węzły na linie włókienniczej poddane badaniom.
Oznaczenia: A – węzeł kluczka,
B – węzeł skrajny tatrzański, C – węzeł ósemka
Fig. 2. Tested knots on fibre ropes. Note: A – overhand loop, B – bowline loop, C – figure eight loop

jest wykonanie węzłów. Dotyczy to głównie sprzętu stosowanego podczas uprawiania sportu i rekreacji [12,13], ale również tego używanego w warunkach przemysłowych, np. w arborystyce. Analizując wykorzystanie węzłów na linach włókienniczych w sprzęcie chroniącym przed upadkiem z wysokości można wyróżnić dwa warianty ich wykonania:

- przez producenta sprzętu (podlegające badaniom i ocenie zgodności z rozporządzeniem [14], przykładem może być pętla z węzłem stanowiąca zakończenie giętkiej prowadnicy urządzenia samozaciskowego [2])
- samodzielne zawiązanie węzła przez użytkownika sprzętu (np. w celu zakotwiczenia liny, połączenia lin alpinistycznych itp.).

W pierwszym przypadku za jakość konstrukcji (wytrzymałość, trwałość itp.) odpowiada producent sprzętu. W rozwiązaniach takich węzły są najczęściej zabezpieczone przed luzowaniem i uszkodzeniami mechanicznymi, chociażby dzięki wykorzystaniu rur z folii termokurczącej lub zaszcisku końca liny wychodzącego z węzła. Konstrukcja



Rys. 3. Stanowisko do badania zdolności zaciskania węzłów. Oznaczenia: 1 – konstrukcja z punktem kotwienia, 2 – badana lina z zawiązanymi węzłami, 3 – przymiar stożkowy, 4 – obciążnik o masie 1 kg
 Fig. 3. Test stand for determination of knotability ratio. Note: 1 – test stand with an anchor point, 2 – tested fibre rope with knots, 3 – gauge for determining knotability ratio, 4 – 1 kg mass

Po zbadaniu lin włókienniczych przedstawionych na rys. 1. uzyskano wyniki w postaci średnicy wewnętrznej prześwitu w węźle D_w oraz wartości współczynnika K; wyniki te zaprezentowano na rys. 4.

Analizując wartości współczynnika K, można zauważyć, że we wszystkich przypadkach zachodzi zależność $K < 1,2$, co oznacza, że jest spełnione wymaganie w zakresie zdolności zaciskania węzłów zawarte w PN-EN 1891:2002 [15].

Zachowanie węzłów w warunkach dynamicznych: podczas powstrzymywania spadania z wysokości

Węzły zawiązane na linach stosowanych do ochrony przed upadkiem z wysokości podczas powstrzymywania spadania są poddawane działaniu sił dynamicznych powodujących ich zaciskanie oraz przemieszczanie się. W celu lepszego rozpoznania tych zjawisk przeprowadzono badania polegające na obciążeniu linek bezpieczeństwa z zawiązanymi węzłami spadającym sztywnym obciążnikiem o masie 100 kg. Obiektami badań były linki bezpieczeństwa o długości około 2 m, wykonane z materiałów przedstawionych na rys. 1. Linki były zakończone pętlami o długości około 20 cm z węzłem typ kluczka. Podczas po-

wstrzymywania spadania sztywnego obciążnika, za pomocą cyfrowej kamery do szybkich zdjęć, rejestrowano przemieszczenia znaczników zamontowanych na lince bezpieczeństwa. Dzięki temu uzyskano czasowy przebieg wydłużenia pętli z węzłem oraz wolnego odcinka linki. Za pomocą przetwornika pomiarowego siły umieszczonego w miejscu kotwienia linki oraz współpracującego z nim systemu akwizycji danych rejestrowano przebieg siły powstrzymującej spадanie. Wysokość, z jakiej następowało swobodne spадanie sztywnego obciążnika, dobrano tak, aby maksymalna wartość siły powstrzymującej spадanie była zbliżona do 5 kN. Zmierzone wartości bezwzględne wydłużeń pętli z węzłem oraz wolnego odcinka linki dla wytypowanych rodzajów linek przedstawiono na rys. 5. Na rys. 6. przedstawiono natomiast wydłużenia względne, odniesione do wartości początkowych, mierzonych na wyprostowanej, ale nienapiętej lince.

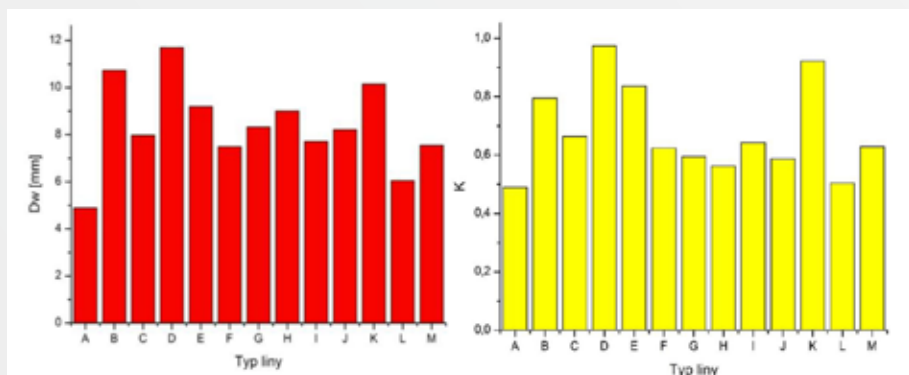
Z przedstawionych wykresów w jednoznaczny sposób wynika, że wydłużenia pętli z węzłami są znacząco większe od wydłużeń wolnych odcinków linki. W skrajnych przypadkach wartość parametru Y1 dziesięciokrotnie przekracza Y2. Za efekt ten odpowiada zaciskanie się węzła i jego przemieszczenie się na lince.

Biorąc pod uwagę różnice w wydłużeniu Y1 i Y2 przy tej samej sile rozciągającej, obliczono, jaką energię kinetyczną spadającego obciążnika pochłania pętla z węzłem, a jaką wolny odcinek linki. Uzyskane wyniki w postaci względnej, tzn. odniesione do całkowitej energii pochłoniętej przez linkę bezpieczeństwa podczas powstrzymywania spadania obciążnika, przedstawiono na rys. 7.

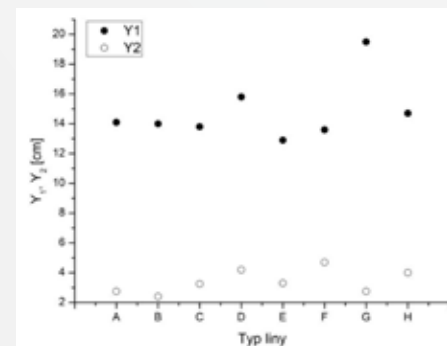
Z wykresu tego jednoznacznie wynika, że podczas rozciągania węzły pochłaniają więcej energii mechanicznej niż wolny odcinek linki. W przebadanych przypadkach względna wartość energii pochłoniętej przez pętlę z węzłem zawierała się w granicach od 16% do 40%.

Wpływ węzła na wytrzymałość linki

W celu oceny wpływu węzłów na parametry mechaniczne lin włókienniczych przeprowadzono badania wytrzymałościowe polegające na rozciąganiu linek aż do zerwania i rejestrowaniu mak-



Rys. 4. Wyniki badań zdolności zaciskania węzłów na linach włókienniczych
 Fig. 4. Tests results of knotability ratio of fibre ropes



Rys. 5. Wydłużenia zakończenia linki w postaci pętli z węzłem (Y1) oraz prostego odcinka linki (Y2) podczas obciążenia dynamicznego
 Fig. 5. Elongations of the rope end (Y1) (in the form of a loop with a knot) and a straight section of the rope (Y2) during dynamic load

symalnej wartości siły poprzedzającej zerwanie. W pierwszej kolejności przebadano liny bez węzłów (dwumetrowe odcinki lin przedstawionych na rys. 1., umieszczane w szczękach maszyny wytrzymałościowej), co pozwoliło otrzymać wartości odniesienia. Następnie badaniom poddano odcinki lin, z jednej strony zakończone pętlami z węzłami, według rys. 2., a z drugiej – z wolnym końcem zaciśniętym w szczękę maszyny wytrzymałościowej.

Na rys. 8. uwidoczniło się względne wyniki badań siły zrywającej lin z węzłami, odniesione do siły zrywającej lin bez węzłów. Z wykresu tego w jednoznaczny sposób wynika, że węzły osłabiają liny, gdyż wartość względna siły zrywającej dotycząca lin z węzłami zawiera się w granicach od około 57% do 80% siły w stosunku do lin bez węzłów. Największe osłabienie wystąpiło w przypadku węzła typ kluczka.

W badaniach trójżyłowych poliamidowych i poliestrowych lin, oznaczonych jako F, G, I, zastosowano również próbki zakończone pętlą z zaplotem powrotnym. W przypadku lin K wykonano badania próbek zakończonych pętlą uzyskaną za pomocą szwu, wykonanego na specjalistycznej maszynie szwalniczej. W obu tych wariantach otrzymano siły zrywające zbliżone do sił dotyczących lin bez węzłów.

Podsumowanie

Analizując przedstawione w artykule wyniki badań, można zauważyć, że węzły, mimo prostej konstrukcji, mają istotny wpływ na właściwości mechaniczne lin włókienniczych oraz na ich zachowanie podczas powstrzymywania spadania z wysokości. Badania pokazały, że właściwości liny włókienniczej wpływają na zdolność zaciskania na niej węzłów. W praktyce oznacza to, że nie na wszystkich rodzajach lin można wykonać węzły gwarantujące bezpieczeństwo użytkowników.

Podczas obciążania liny z węzłem następuje jego zaciskanie, któremu towarzyszy tarcie zarówno na powierzchni liny, jak i wewnątrz jej struktury oraz jej zgniatanie. Konstrukcja taka pochłania w efekcie energię kinetyczną podczas

powstrzymywania spadania. Zjawisko to wiąże się z większym wydłużeniem np. pętli z węzłem w stosunku do prostego odcinka liny. Zaciskaniu węzła towarzyszy niszczenie włókien, z których jest wykonana lina, co w efekcie obniża wartości jej siły zrywającej. Zjawisko to ujawniło się dla wszystkich przebadanych rodzajów lin oraz węzłów. Jest to efekt krytyczny, o którym powinni pamiętać pracownicy próbujący samodzielnie „modyfikować” swój sprzęt ochronny, szczególnie w sytuacji, gdy lina jest już osłabiona przez inne czynniki, np. starzenie pod wpływem promieniowania UV.

W przypadku, gdy liny zakończone były pętlą z zaplotem powrotnym lub zaszyciem, nie obserwowano istotnego obniżenia wytrzymałości, a wręcz – w przypadku lin F, G – uzyskano większą wartość siły zrywającej w stosunku do samej liny zakleszczonej w samozaciskowych szczękach maszyny wytrzymałościowej. Oznacza to, że w odniesieniu do sprzętu przeznaczonego do stosowania w warunkach przemysłowych trwałymi i wytrzymałymi zakończeniami, np. linek bezpieczeństwa, są pętle z zaplotami powrotnymi na linach skręcanych i pętle z zaszyciem końcem na linach rdzeniowych. Konstrukcje te pozwalają również na zainstalowanie kausz w pętlach – co chroni je przed przetarciem – oraz odpowiednich łączników.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 795:2012 Ochrona przed upadkiem z wysokości – Urządzenia kotwiczące.
- [2] PN-EN 353-2:2005 Środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkiem z wysokości – Część 2: Urządzenia samozaciskowe z giętką prowadnicą.
- [3] PN-EN 360:2005 Środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkiem z wysokości – Urządzenia samohamowne.
- [4] PN-EN 355:2005 Środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkiem z wysokości – Amortyzatory.
- [5] PN-EN 354:2012 Środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkiem z wysokości – Linki bezpieczeństwa.

[6] PN-EN 12841:2009 Środki indywidualnej ochrony przed upadkiem z wysokości – Linowe systemy asekuracyjne i wspomagające pracę – Urządzenia regulacyjne dla lin.

[7] BASZCZYŃSKI, K., JACHOWICZ, M. Load-Elongation Characteristics of Connecting and Shock-Absorbing Components of Personal Fall Arrest Systems. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2012,20,(95): 78-85.

[8] BECKER, K. Ropes in fall protection systems. [in] A.C. Sulowski (ed.), *Fundamentals of fall protection*. Toronto, Canada, International Society for Fall Protection, 1991.

[9] BASZCZYŃSKI, K., ZROBEK, Z. Wpływ atmosferycznych warunków na działanie urządzeń samozaciskowych z giętkimi prowadnicami. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka* 2000,347(6): 17-19.

[10] EN 919:1995 Fibre ropes for general service – Determination of certain physical and mechanical properties.

[11] EN 701:1995 Fibre ropes for general service – General specification.

[12] LWOW, A. Liny alpinistyczne. Wrocław, Filar, 1992.

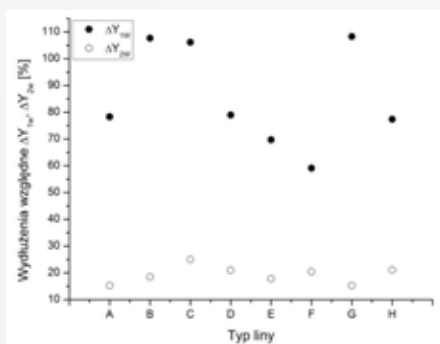
[13] PN-EN 892+A1:2016 Sprzęt alpinistyczny – Dynamiczne liny do wspinaczki – Wymagania bezpieczeństwa i metody badań.

[14] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG.

[15] PN-EN 1891:2002 Sprzęt ochrony indywidualnej zapobiegający upadkom z wysokości – Liny rdzeniowe w oplocie o małej rozciągłości.

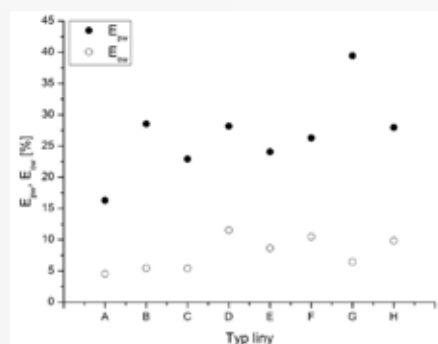
Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2021-2022 w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rozwoju, Pracy i Technologii.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.



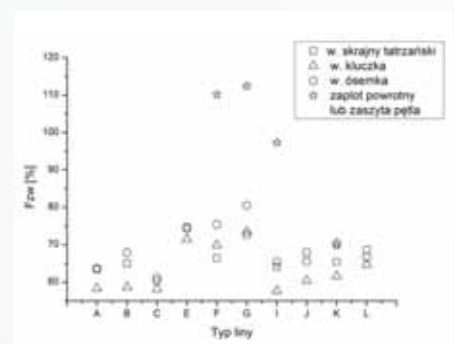
Rys. 6. Wydłużenia względne zakończenia linki w postaci pętli z węzłem (ΔY_{1W}) oraz prostego odcinka linki (ΔY_{2W}) podczas obciążenia dynamicznego

Fig. 6. Relative elongations of the rope end (ΔY_{1W}) (in the form of a loop with a knot) and a straight section of the rope (ΔY_{2W}) during dynamic load



Rys. 7. Pochłanianie energii przez zakończenie liny w postaci pętli z węzłem (E_{pw}) oraz prostego odcinka liny (E_{ow}) odniesione do całkowitej energii pochłoniętej przez linkę

Fig. 7. Energy absorption by the rope end (E_{pw}) (in the form of a loop with a knot) and a straight section of the rope (E_{ow}) related to the total energy absorbed by the lanyard



Rys. 8. Względne wartości siły zrywającej linę z zawiązanym węzłem

Fig. 8. Relative values of the breaking force of a rope end in the form of a loop with a knot