Wpływ zginania w zakotwieniu na nośność ściągów gwintowanych w procesie walcowania na gorąco

Mgr inż. Dawid Rewers
ATM Sp. z o.o.

Stężenia konstrukcji w postaci ściągów są wykorzystywane w wielu dziedzinach budownictwa, między innymi:

- do wzmocnienia istniejących konstrukcji, na przykład jako elementy stężające konstrukcje starych budynków wykonanych bez wieńców;
- w konstrukcjach ogólnobudowlanych, na przykład jako elementy stężające fundamenty ram w konstrukcjach halowych czy przenoszące siły rozporowe w dźwigarach dachowych;
- w konstrukcjach geotechnicznych, na przykład jako elementy kotwiące obudowy głębokich wykopów;
- w konstrukcjach hydrotechnicznych, na przykład jako elementy łączące ścianki nabrzeża z konstrukcjami oporowymi.

Z definicji ściągi pracują jako elementy przenoszące wyłącznie siłę rozciągającą, bez możliwości przenoszenia momentów zginających czy obciążeń ściskających. Wynika to z ich małej sztywności – są to elementy prętowe, wiotkie.

RODZAJE KONSTRUKCJI ŚCIĄGÓW

Ściągi geotechniczne najczęściej wykonuje się ze stalowego pręta (cięgna) wyposażonego w odpowiednio dobrane akcesoria, to jest nakrętki kotwiące, elementy oporowe, łączniki zwykłe, łączniki napinające czy połączenia przegubowe. Spotykane są również ściągi w postaci płaskowników, kątowników, ceowników czy dwuteowników, ale są to rozwiązania stosowane głównie w konstrukcjach hal stalowych jako stężenia wiatrowe i nie będą one przedmiotem niniejszego artykułu.

Cięgna ściągów prętowych projektuje i wykonuje się najczęściej w postaci:

1. Pręta gładkiego ze stali konstrukcyjnej;
2. Pręta żebrowanego ze stali zbrojeniowej;
3. Pręta z gorącowalcowanym gwintem na całej długości.

Pręty w rozwiązaniu 1 i 2 należy poddać zabiegowi spęczania oraz gwintowania końcówek w celu umożliwienia nakręcania łączników i nakrętek kotwiących. Zabieg spęczania jest konieczny w celu zapewnienia właściwej nośności ściągu. Błędem jest gwintowanie prętów bez spęczania, gdyż powoduje to znaczne zmniejszenie pola przekroju czynnego cięgna i osłabia wytrzymałość ściągu. Przykładowo, pole przekroju pręta gładkiego o średnicy 48 mm wynosi 1810 mm^2, natomiast zgodnie z [2] pole przekroju czynnego gwintu w rozmiarze M48 wynosi 1473 mm^2 (19% mniej!), pole przekroju czynnego gwintu w rozmiarze M52 wynosi 1758 mm^2 (3% mniej), dopiero pole przekroju czynnego gwintu w rozmiarze M56 (2030 mm^2) zapewnia właściwe połączenie cięgna, bez redukcji wytrzymałości. Rozwiązanie to ma również mankamenty wykonawcze – powoduje, że tolerancja montażowa jest ograniczona do długości wynikających z uprzednio przygotowanych gwintowanych końcówek cięgna. Jeżeli przewidziane w projekcie odcinki gwintowane nie pozwolą na właściwy montaż ściągów, zachodzi konieczność ponownej prefabrykacji cięgna, co jest trudne do wykonania w warunkach budowy. Rozwiązanie 3 polega na zastosowaniu pręta gwintowanego na całej długości w procesie walcowania na gorąco. W odróżnieniu od pręta gładkiego czy żebrowanego, gwint jest systemowo zaprojektowany tak, aby nie zmniejszać wytrzymałości cięgna, co eliminuje błędy projektowe w tym zakresie. Stosując akcesoria zgodne z wybranym rodzajem i średnicą pręta, mamy gwarancję, że nie spowodują one zmniejszenia wytrzymałości ściągu. Jest to również rozwiązanie dające niemal nieograniczoną tolerancję montażową – skracanie i przedłużanie ściągu na budowie nie wymaga stosowania specjalistycznego sprzętu i może być przeprowadzone w krótkim czasie. Dodatkowym atutem tego rozwiązania jest rodzaj gwintu. Gwint nanoszony w procesie walcowania na gorąco jest gwintem grubym, który w odróżnieniu od gwintu drobnozwojnego jest odporny na uszkodzenia i łatwy do wyczyszczenia na przykład w sytuacji zachlapania zaczynem cementowym. Tolerancje montażowe gwintu trapezowego są dużo większe niż gwintu metrycznego, co pozwala na prawidłowe nakręcenie akcesoriów przy znacznych odchyleniach osiowych, dochodzących do 3°.

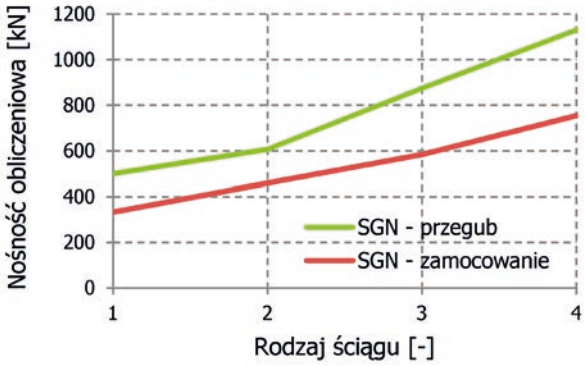
ELEMENTY SKŁADOWE KONSTRUKCJI ŚCIĄGU

Typowy ściąg składa się z cięgna, głowicy (zakotwienia) i złączy. W zależności od rodzaju stężanej konstrukcji, dostępu do jej elementów na etapie montażu czy możliwości transportu ściągi mogą być wyposażone w elementy dodatkowe. Przykład ściągu o podstawowym układzie konstrukcyjnym pokazano na rys. 1, a przykłady konstrukcji ściągów zawierających elementy dodatkowe pokazano na rys. 2 i 3.

Rys. 1. Ściąg o prostym układzie konstrukcji

Rys. 2. Ściąg z łącznikiem

Rys. 3. Ściąg z łącznikiem i złączem przegubowym



Rys. 4. Porównanie nośności ściągów

Tabl. 1 Nośność obliczeniowa ściągów

Warunki pracy	Parametr	Jednostka	Średnica / rodzaj gwintu / gatunek stali			
			TYP 1	TYP 2	TYP 3	TYP 4
[–]	[–]	[–]	Ø48 / M48 / S355	Ø48 / M56 / S355	Ø50 / T50 / SAS 550	Ø50 / TR50 / SAS 670
SGN – zamocowanie	$F_{tt,Rd}$	[kN]	332	458	583	754
	$F_{tg,Rd}$	[kN]	606	606	1078	1315
	minimum ($F_{tt,Rd}$; $F_{tg,Rd}$)	[kN]	332	458	583	754
SGN – przegub	$F_{tt,Rd}$	[kN]	498	687	875	1131
	$F_{tg,Rd}$	[kN]	606	606	1078	1315
	minimum ($F_{tt,Rd}$; $F_{tg,Rd}$)	[kN]	498	606	875	1131

OBLICZENIA NOŚNOŚCI ŚCIĄGÓW

Nośność ściągów oblicza się zgodnie z normą [4], punkt 7.2. Nośność należy sprawdzić w stanie granicznym nośności (SGN) i użytkowania, przy czym w niniejszym artykule zajmiemy się wyłącznie tematem nośności w SGN.

Nośność ściągu na rozciąganie w stanie granicznym nośności określona jest jako minimum z wartości $F_{tt,Rd}$ i $F_{tg,Rd}$,

$$F_{tt,Rd} = k_t \frac{f_{ua} A_S}{\gamma_{M2}} \; ; \; F_{tg,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}}$$

gdzie:

$F_{tt,Rd}$ – nośność na rozciąganie części gwintowanej ściągu,
$F_{tg,Rd}$ – nośność na rozciąganie trzpienia kotwy.
k_t – współczynnik uzależniony od warunków zamocowania cięgna; jeżeli występuje możliwość zginania kotwy w wyniku jej zamocowania, należy przyjmować wartość $k_t = 0{,}6$, natomiast wartość $k_t = 0{,}9$ można przyjmować tylko wtedy, gdy połączenie pręta ze ścianką nie przenosi momentów zginających,
f_{ua} – wytrzymałość na rozciąganie stali ściągu,
f_y – granica plastyczności stali ściągu,
A_S – pole przekroju czynnego części gwintowanej ściągu,
A_g – pole przekroju trzpienia ściągu (pole przekroju części brutto, bez gwintu),
γ_{M0} = 1,00 zgodnie z punktem 5.1.1 (4) normy [5],
γ_{M2} = 1,25 zgodnie z punktem 7.1 (4) normy [5].

Rys. 5. Przykład nieprawidłowego ukształtowania geometrii ściągu

Porównanie nośności obliczeniowej czterech rodzajów ściągów przedstawiono w tabl. 1 oraz na rys. 4.

ZGINANIE W ZAKOTWIENIU ŚCIĄGU

Jak przedstawiono w tabl. 1 dopuszczenie do możliwości zginana ściągu w jego zamocowaniu powoduje znaczne ograniczenie jego nośności obliczeniowej. Zginanie w zamocowaniu ściągu może pojawić się na skutek:

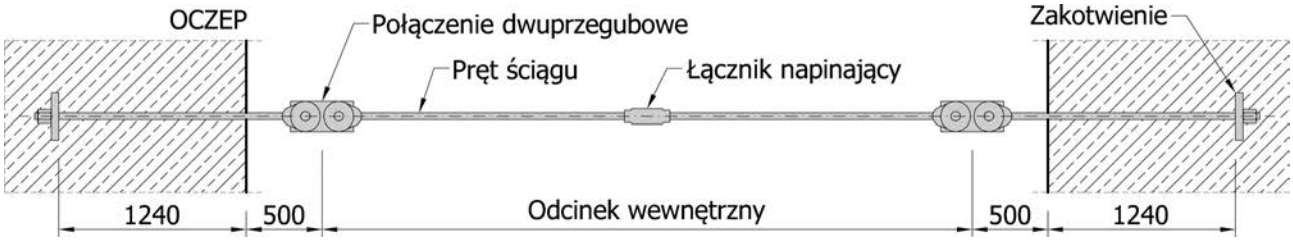
– niewłaściwego ukształtowania geometrii ściągu;

  Dzieje się tak w sytuacji, gdy ściąg nie jest prostoliniowy. Spowodowane jest to chęcią uproszczenia geometrii zakotwienia ściągu i ukształtowania go prostopadle do kotwionej konstrukcji, w sytuacji, gdy jej układ wymusza inny przebieg ściągu (na przykład ściągi narożnikowe). Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys. 5. Efektem takiego układu będzie zginanie ściągu w miejscu lica oczepu żelbetowego w docelowej fazie pracy konstrukcji i „prostowanie się" całego układu ściągów, niezależnie od zastosowanych połączeń przegubowych. Może to prowadzić do nadmiernych przemieszczeń całej konstrukcji oporowej. Autor nie znajduje uzasadnienia dla takiego ukształtowania ściągu. Optymalnym rozwiązaniem w tej sytuacji jest ukształtowanie zakotwienia ściągu do ścianki szczelnej pod kątem wynikającym z przebiegu ściągu, tak aby było w jednej linii z całym ściągiem.

– nadmiernego zwisu ściągu w trakcie montażu, przed okresem właściwej eksploatacji;

  Problem ten dotyczy zwłaszcza długich ściągów o dużej średnicy i masie. Montowanie luźnego ściągu bez podparcia go na długości sprawia, że ściąg wisi na zako-

Rys. 6. Przykład prawidłowego montażu długich ściągów



Rys. 7. Przykład zbędnego zastosowania połączenia przegubowego

twieniach, powodując swoim ciężarem zginanie cięgna w zakotwieniu lub w licu żelbetowego oczepu. Może to prowadzić do trwałych deformacji cięgna oraz elementów zakotwień, które będą miały wpływ na jego wytrzymałość w docelowej fazie pracy, nawet gdy ściąg będzie wyprostowany i wstępnie naciągnięty. Przykład prawidłowego montażu długich ściągów pokazano na rys. 6.

– niewłaściwego prowadzenia robót;

  Sytuacją niedopuszczalną jest brak osłony ściągu w momencie zasypywania konstrukcji oporowej gruntem. Działające w takiej sytuacji na ściąg siły pochodzące od ciężaru gruntu i ciężaru samego ściągu mogą prowadzić do zniszczenia ściągu i bardzo dużych deformacji konstrukcji.

– nadmiernych przemieszczeń konstrukcji w fazie eksploatacji;

  Przemieszczenia prawidłowo zaprojektowanej konstrukcji budowli w trakcie eksploatacji są znikome. Przyjmując zgodnie z [6] ograniczenie przemieszczeń w SGU do 1/300 rozpiętości, otrzymujemy możliwość obrotu cięgna w zakotwieniu o kąt:

$$\Delta\varphi = \mathrm{arctg}\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \mathrm{arctg}\left(\frac{1}{300}\right) \approx 0{,}19^\circ$$

  W opinii autora obrót ściągu w zakotwieniu o kąt 0,19°, nawet przy uwzględnieniu towarzyszącej docelowej siły rozciągającej w fazie eksploatacji obiektu, nie ma żadnego wpływu na wytrzymałość ściągu. Wszelkiego rodzaju większe przemieszczenia i obroty są oznaką niewłaściwej pracy konstrukcji i możliwości rychłej awarii. Nadmierne przemieszczenia konstrukcji mogą być również spowodowane nieprawidłowym ukształtowaniem geometrii ściągu, o czym wspomniano wcześniej.

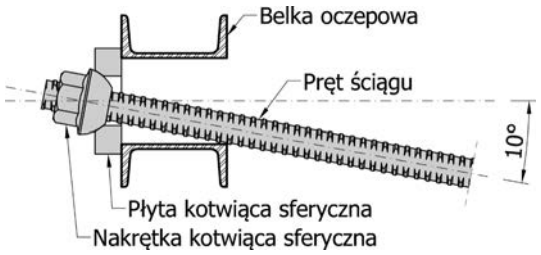
STOSOWANIE POŁĄCZEŃ PRZEGUBOWYCH

W celu uniknięcia konieczności zmniejszania wytrzymałości ściągu ze względu na zginanie w zakotwieniu w projektach ściągów stosowane są połączenia przegubowe, które w teorii mają za zadanie pozbycie się możliwości zginania cięgna. Rozwiązanie takie ma sens wyłącznie wówczas, gdy połączenie przegubowe umiejscowione jest w teoretycznym miejscu obrotu ściągu. Niestety najczęściej połączenia przegubowe z przyczyn technicznych nie mogą być zlokalizowane w miejscu, w którym może wystąpić obrót i zginanie cięgna (na przykład ze względu na konieczność ukształtowania zwieńczenia czy kwestie montażowe), są natomiast lokalizowane w innych miejscach, niejako „na zapas". Rozwiązanie takie pokazano na rys. 7. Autor w swojej pracy zawodowej wielokrotnie spotykał się z podobnymi projektami.

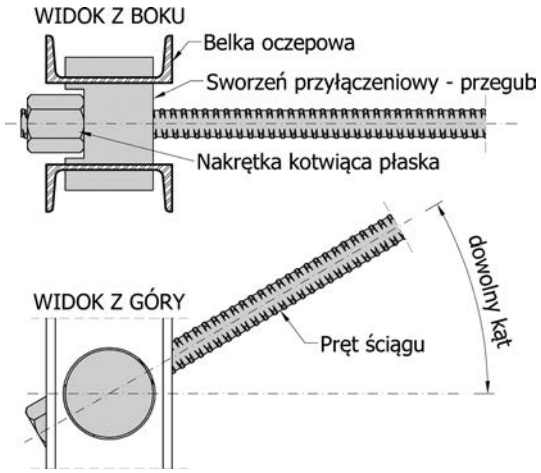
Przegub zastosowany w powyższym układzie nie powoduje „uwolnienia" ściągu od momentów zginających. Moment zginający cięgno powstaje nie w miejscu zastosowania przegubu (co zapewne było intencją autora powyższego rozwiązania), a w miejscu wynikającym z twardych reguł statyki.

STOSOWANIE SYSTEMOWYCH ZAKOTWIEŃ PRZEGUBOWYCH W MIEJSCU ZAKOTWIENIA

Jednym z rozwiązań problemów związanych z powstawaniem momentów zginających w zakotwieniach ściągów jest stosowanie systemowych zakotwień przegubowych, pozwalających na obrót ściągu w zakotwieniu. Możliwość taką zapewnia system gorącowalcowanych ściągów SAS. System ten pozwala na kształtowania zakotwień w sposób pokazany poniżej. W przypadku zastosowania nakrętki sferycznej (rys. 8) kąt

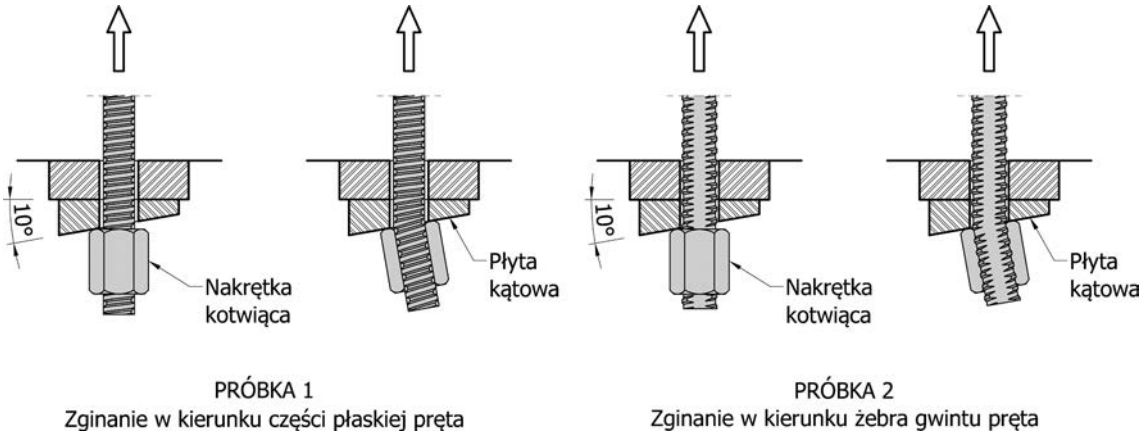


Rys. 8. Zakotwienie z wykorzystaniem nakrętki sferycznej



Rys. 9. Zakotwienie z wykorzystaniem sworznia w belce oczepowej

Rys. 10. Struktura stali



Rys. 11. Schematy badania próbek

obrotu ściągu w zakotwieniu jest ograniczony do około 10°, w zależności od zastosowanej średnicy pręta i klasy stali. Jest to wartość wystarczająca do zapewnienia swobody montażu i ewentualnych różnic w geometrii wykonanej ścianki szczelnej, z uwzględnieniem tolerancji montażowych w zakresie dokładności jej instalacji. W przypadku zakotwienia z wykorzystaniem sworznia w belce oczepowej (rys. 9) kąt obrotu jest w zasadzie nieograniczony, determinują go wyłącznie uwarunkowania geometryczne samej konstrukcji oporowej.

Powyższe rozwiązania niwelują problemy z obrotem ściągów w zakotwieniu, jednak warunkiem ich prawidłowej pracy jest brak żelbetowego oczepu zwieńczającego ściankę. W sytuacji w której zakotwienie ściągu znajduje się w żelbetowym oczepie, wszelkie możliwości obrotu w zakotwieniu są blokowane, a ściąg w dalszym ciągu narażony jest na zginanie. W kolejnym punkcie opisano wpływ odgięcia na wytrzymałość gorącowalcowanych ściągów SAS w takiej sytuacji.

WPŁYW NIEZAMIERZONEGO ODCHYLENIA KĄTOWEGO NA WYTRZYMAŁOŚĆ ŚCIĄGÓW SAS

Ściągi SAS wykonywane są z prętów gwintowanych na całej długości w procesie walcowania na gorąco. Oznacza to, że gwint nanoszony jest w procesie obróbki cieplnej całego pręta, bez mechanicznej ingerencji w strukturę stali (jak ma to miejsce w przypadku gwintów nacinanych lub walcowanych na zimno). Struktura stali jest jednorodna na całym pręcie, również w bezpośredniej bliskości żeber gwintu, dzięki czemu ściąg nie jest narażony na powstawanie zjawiska karbu naprężeniowego. Różnicę w strukturze stali między poszczególnymi rodzaju gwintów pokazano obrazowo na rys. 10.

W celu określenia wpływu odgięcia prętów gorącowalcowanych SAS na ich wytrzymałość wykonano badania na rozciąganie pręta Ø50 ze stali SAS 670/800, symulujące niezamierzone odgięcie ściągu w zakotwieniu o kąt 10°. Ze względu na fakt, że gwint prętów SAS nie zajmuje całego obwodu pręta, a zlokalizowany jest po jego przeciwnych stronach, wykonano badanie na rozciąganie dwóch próbek. Próbkę pierwszą przygotowano tak, aby odgięcie następowało w kierunku strefy gładkiej między żebrami gwintu, a w próbce drugiej pręt obrócono o 90° wokół własnej osi tak, aby zginanie następowało w kierunku żeber gwintu. Schematy próbek pokazano na rys. 11. Zdjęcie próbki numer 1 w maszynie wytrzymałościowej przed wykonaniem badania pokazano na rys. 12.

Rys. 12. Próbka w maszynie wytrzymałościowej przed wykonaniem badania

Pręty poddane badaniom charakteryzowały się następującymi parametrami mechanicznymi:

- charakterystyczna siła uplastyczniająca zgodnie z [1]: F_{yk} = 1315 kN,
- średnia rzeczywista zbadana siła uplastyczniająca: $F_{y,av}$ = 1449,7 kN,
- charakterystyczna siła zrywająca zgodnie z [1]: F_{tk} = 1570 kN,
- średnia rzeczywista zbadana siła zrywająca: $F_{t,av}$ = 1658,3 kN.

Powyższe wyniki potwierdzone zostały certyfikatem 3.1 zgodnym z EN 10204, pokazanym na rys. 13.

Zerwanie próbek nastąpiło przy sile 1629,29 kN (próbka 1) i 1604,03 kN (próbka 2). W obydwu przypadkach siła ta przekracza charakterystyczną wartość siły zrywającej pręt (1570 kN). Wykres z badania prętów pokazano na rys. 14, a zdjęcia próbek po zerwaniu na rys. 15 i 16.

Stahlwerk Annahütte
Max Aicher GmbH. & Co. KG.
Max-Aicher-Allee 1+2
D 83404 Ainring-Hammerau

Auftragsnr. / Works order No. / No. de commande: A X 0010
Datum. / Date / Date: 29.01.15
Kundenbestellung Nr. / Customer order No. / No. de commande client
Schmelze Nr. / Cast No. / No. de Coulee: 275235
Int. Nr.: A0276

ZERTIFIKAT * CERTIFICATE * CERTIFICAT EN 10204 — Abnahmeprüfzeugnis 3.1

Erzeugnisform / Product form / Forme de produit: Ankerstahl rechtsg Ø 50 S670
Abmessung / Dimension / Dimension: 50,0 mm
Anforderungen / Requirements / Exigences: ETA-13/0840
Werkstoff / Material / Materiau: E S670
Werkstoff Nr. / Material No. / No. de materiau: 1.0870

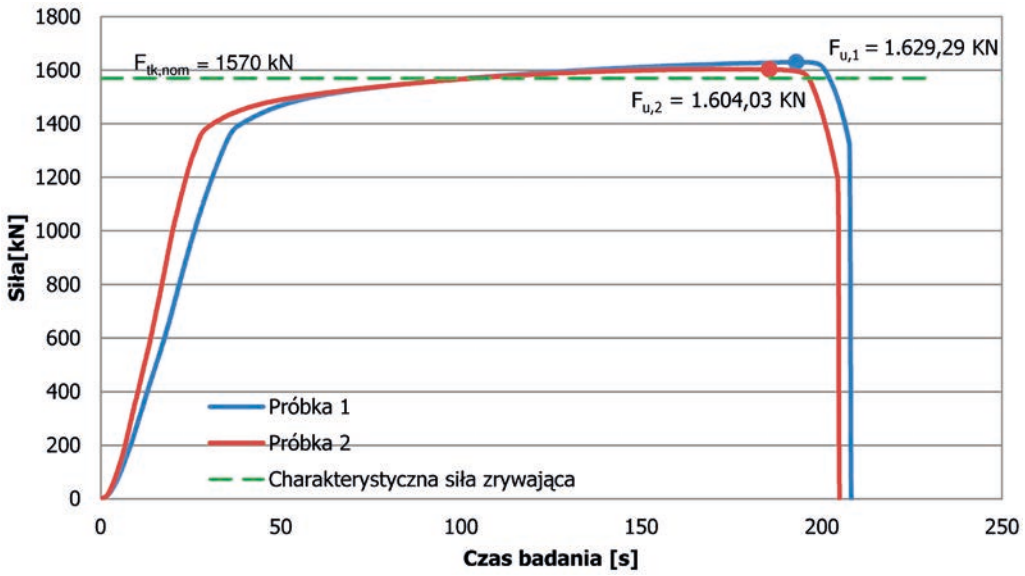
SCHMELZANALYSE % * HEAT ANALYSIS % * ANALYSE DE COULEE %

C 0,21	Si 0,25	Mn 1,42	P 0,012	S 0,006	Cr	Mo	Ni
Cu	Sn	Al	V 0,10	B	Ti	Nb	W
Co	Sb	As	Te	Ca	N	H	Ceq 0,54

ZUGVERSUCH * TENSILE TEST * ESSAI DE TRACTION

Behandlungszustand / Treatment cond. / Etat de traitement	Probe Nr. / Specimen No. / No. d'eprouvette	Querschnitt mm² / Cross section / Eprouvette	Streckgrenze Fe [kN] 1) / Yield load / Limite elastique	Streckgrenze Re [N/mm²] 1) / Yield strength / Limite elastique	Höchstlast Fm [kN] / Maximum force / charge maximum	Zugfestigkeit Rm [N/mm²] / Tensile strength / Resistance a la traction	Dehnung A5 [%] / Elongation / Allongement	Dehnung A10 [%] / Elongation / Allongement	Dehnung Agt [%] / Elongation / Allongement	Brucheinschnürung Z [%] / Reduct. of area / Striction / la rupture
TC	2	1964,0	1443	736	1664	849	16,9	11,4	6,4	
TC	8	1954,0	1446	738	1653	843	16,7	11,0	8,2	
TC	19	1952,0	1460	745	1658	846	16,5	10,6	6,6	

Rys. 13. Certyfikat 3.1 dla wytopu z którego pochodziły badane pręty



Rys. 14. Wykres z badania prętów

Rys. 15. Próbka numer 1 po zerwaniu

Rys. 16. Próbka numer 2 po zerwaniu

Zerwanie próbki 1 nastąpiło w części środkowej pręta, poza zakotwieniem. W przypadku próbki 2 zerwanie nastąpiło w zakotwieniu, a płaszczyzna przełomu przebiega zarówno przez żebro gwintu, jak i przez rdzeń pręta. Siła, przy której nastąpiło zerwanie, była w obydwu przypadkach wyższa niż nominalna charakterystyczna siła zrywająca pręt. Oznacza to, że odgięcie prętów w zakotwieniu o kąt 10° nie ma wpływu na nośność ściągu SAS. Zdaniem autora nośność poprawnie zaprojektowanych ściągów z gwintem wykonanym w procesie walcowania na gorąco należy obliczać z uwzględnieniem współczynnika zamocowania k_t = 0,9, niezależnie od sposobu zamocowania w konstrukcji. Z punktu widzenia ekonomii rozwiązania należy zastanowić się nad wprowadzeniem współczynnika zamocowania k_t = 1,0, stosowanego wyłącznie w przypadku ściągów z gwintem wykonywanym w procesie walcowania na gorąco.

PODSUMOWANIE

Właściwe ukształtowanie przebiegu ściągu jest niezwykle istotne ze względu na poprawność jego pracy w konstrukcji. Pozwala to już na etapie projektu uniknąć niepożądanych efektów wpływających negatywnie na trwałość rozwiązania. Należy zwrócić szczególną uwagę na prostoliniowość wszystkich odcinków ściągu, poprawność doboru akcesoriów kształtujących zakotwienie oraz sposób ich wykorzystania.

Użycie wyrafinowanych rozwiązań (na przykład połączeń przegubowych) niekoniecznie prowadzi do pozbycia się problemu zginania w zakotwieniu ściągów. Z pewnością prowadzi do zbędnego podnoszenia kosztu całego rozwiązania.

Stosowanie systemowych rozwiązań w zakresie konstrukcji ściągów gwarantuje poprawność jego ukształtowania, co ma znaczący wpływ na zachowanie właściwej wytrzymałości i trwałości.

Ściągi gwintowane na całej długości pozwalają na bezproblemowe dostosowanie ich przebiegu na budowie, co jest ważne z punktu widzenia wykonawcy pod kątem szybkości i elastyczności montażu.

Stosowanie ściągów wykonanych z prętów gwintowanych w trakcie procesu walcowania na gorąco znacząco redukuje możliwość osłabienia ściągu, będącego rezultatem niezamierzonego odgięcia w zakotwieniu. Wykonane badania dla kąta odgięcia 10° wskazują, że nawet duże odchylenie od osi pręta (możliwe w zasadzie wyłącznie na skutek błędu projektowego lub wykonawczego) nie powoduje zmniejszenia jego wytrzymałości, dzięki czemu ściągi te są jednym z bezpieczniejszych rozwiązań na rynku.

LITERATURA

1. AT/2011-02-2767/2 Aprobata techniczna IBDiM. Pręty gwintowane SAS do zastosowań konstrukcyjnych i geotechnicznych.

2. DIN 13-1:1999 General purpose ISO metric screw threads. Part 1: Nominal sizes for 1 mm to 68 mm coarse pitch threads.

3. EN 10025-2 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2: Warunki techniczne dostaw stali konstrukcyjnych niestopowych.

4. PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

5. PN-EN 1993-5 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 5: Palowanie i ścianki szczelne.

6. PN-EN 1997-1 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.