

GIĘCIE NA ZIMNO

wyrobów gorącowalcowanych



mgr inż. Krzysztof Marcinczak
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Politechnika
Wrocławska

Ciekawe formy architektoniczne i wyrafinowane kształty konstrukcji stalowych są coraz częściej stosowane w różnego rodzaju konstrukcjach – przekrycia, mosty, hale. Nadawanie elementom wygięcia i podniesienia wykonawczego najczęściej realizowane jest za pomocą gięcia na zimno.

W artykule przedstawiono technologię formowania na zimno stalowych kształtowników dwuteowych, omówiono konsekwencje gięcia na zimno oraz modele numeryczne procesu gięcia utworzone w programie ABAQUS.

Gięcie na zimno elementów wykonywane jest za pomocą maszyny wyposażonej w cztery wałki – dwa zewnętrzne, jeden centralny i wałek przytrzymujący (rys. 1.). Mechanizm pracy maszyny sprowadza się do trójpunktowego zginania belki. Gięcie elementów wykonywane jest w temperaturze otoczenia. Można wyróżnić dwie technologie gięcia na zimno – rolkową i punktową.

Punktowe gięcie na zimno

Punktowe gięcie na zimno najczęściej jest wykorzystywane podczas nadawania belkom przeciwstrzałki. Maszyna do gięcia punktowego składa się z dwóch podpór stałych, pomiędzy nimi znajduje się trzecia podpora, która wyposażona jest w siłownik nadający obciążenie i w konsekwencji wygięcie elementu (Fot. 1a). Odległość pomiędzy skrajnymi podporami stałymi zależna jest od wskaźnika na zginanie elementu, któremu chcemy nadać przeciwstrzałkę. Odległość ta mieści się w przedziale od 2 do 5 m. Operator maszyny kontroluje wysunięcie siłownika i w ten sposób określa nadane wygięcie. Belka jest punktowo obciążana w ok. 8–12 miejscach na długości belki. Po pierwszym punktowym obciążeniu mierzone jest odchylenie belki od osi pierwotnej belki, a następnie belka jest ponownie doginana w celu uzyskania pożądanej strzałki wygięcia (fot. 1b). Uzyskanie ostatecznego kształtu ele-

mentu jest uzależnione tylko od precyzji i kwalifikacji operatora.

Rolkowe gięcie na zimno

Maszyna do rolkowego gięcia na zimno wyposażona jest w rolki, które umożliwiają ciągłe gięcie belki. W tej technologii zazwyczaj jedna z rolek skrajnych jest przemieszczana za pomocą siłownika w celu wygięcia belki (fot. 2a). Metoda ta pozwala osiągnąć o wiele mniejsze promienie gięcia, dokładniejszy kształt i łagodne przejście pomiędzy różnymi promieniami na długości jednego elementu. Belka podczas gięcia, w którym chcemy uzyskać stosunkowo mały promień gięcia, musi być zabezpieczona w celu uniknięcia deformacji środka i pasów. Gięcie wykonywane jest na kilku etapach. Docelowy promień wygięcia najczęściej uzyskiwany jest poprzez kilkukrotny przejazd belki przez maszynę. W celu zmniejszenia tarcia pomiędzy elementami maszyny a kształtowaną belką jest ona pokrywana specjalną substancją. Weryfikacja ostatecznego promienia wygięcia polega na pomiarze odcinkowej strzałki pomiędzy dwoma punktami wewnętrznej strony belki (fot. 2b).

Konsekwencje plastycznego odkształcenia stali na zimno

Odporność na kruche pęknięcie

Materiał, który doznał odkształcenia plastycznego na zimno, do punktu C na rysunku 2., a następnie został odciążony (prosta C-D), zmniejsza swoją odporność na kruche pęknięcie wskutek zmniejszenia wydłużenia całkowitego. Gdyby ponowne obciążenie konstrukcji było natychmiastowe, zależność σ - ϵ była-

by reprezentowana linią DCEF. Sytuacja taka jest mało realna ze względu na proces przygotowania i realizacji obiektu do czasu eksploatacji. Najczęściej obciążenie następuje po pewnym czasie (obciążenie zwłoczne) – zależność σ - ϵ przebiega wtedy linią DC'E'F'. Należy wtedy ustalić nową granicę plastyczności R'_{0,2}. W wyniku starzenia się materiału zgniecionego na zimno zmniejsza się odporność stali na kruche pęknięcie, w związku z czym należy uwzględnić proces gięcia na zimno podczas doboru jakości stali [2].

Dobór klasy jakości stali wg PN-EN 1993-1-10 [3] należy przeprowadzić dla elementów rozciąganych lub ze strefami rozciąganyymi oraz elementów narażonych na zmęczenie. Dla elementów całkowicie ściskanych nie ma potrzeby określania odporności na kruche pęknięcie. Podstawowy warunek normowy odporności na kruche pęknięcie jest wyrażony wzorem (1).

$$T_{Ed} \geq T_{Rd} \quad (1)$$

gdzie:

T_{Ed} – temperatura obliczeniowa,
 T_{Rd} – temperatura graniczna odpowiadająca bezpiecznemu poziomowi odporności na kruche pęknięcie w określonych warunkach.

Temperaturę obliczeniową T_{Ed} w miejscu potencjalnego pęknięcia początkowego wyznacza się według wzoru (2)

$$T_{Ed} = T_{md} + T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + \Delta T_\epsilon + \Delta T_{e,cf} \quad (2)$$

gdzie:



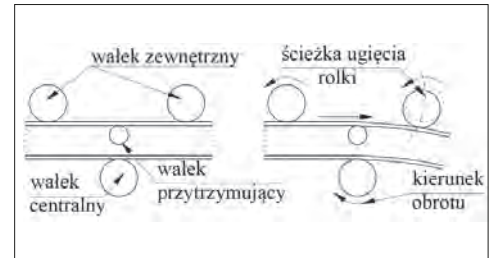
Fot. arch. Konsten Europe

T_{md} – najniższa temperatura powietrza o ustalonym okresie powrotu, patrz: EN 1991-1-5,
 ΔT_r – składnik uwzględniający straty promieniowania, patrz: EN 1991-1-5,
 ΔT_σ – składnik uwzględniający naprężenia i granicę plastyczności materiału, imperfekcje pęknięć oraz kształt i wymiary elementu,
 ΔT_R – składnik bezpieczeństwa umożliwiający różnicowanie poziomów niezawodności przy różnych zastosowaniach,
 ΔT_ε – składnik uwzględniający inną szybkość odkształcenia niż szybkość podstawowa $\varepsilon_0 = 4 \times 10^{-4} / \text{sec}$,
 $\Delta T_{\varepsilon, cf}$ – składnik uwzględniający stopień odkształcenia na zimno ε_{cf} , $\Delta T_{\varepsilon, cf} = -3\varepsilon_{cf}$
 ε_{cf} – odkształcenie na zimno, $\varepsilon_{cf} = 1/(1+2(r/t))$.

Analiza numeryczna gięcia na zimno

W programie ABAQUS 6.14-2 stworzono dwa modele obliczeniowe. Model zbudowano z elementów SOLID typu C3D8R [4]. Zamodelowano kształtownik HEB320 ze stali S235 o charakterystyce sprężysto-plastycznej. Rozstaw wałków skrajnych przyjęto równy 2,5 m (rys. 3.). Wałki zostały zamodelowane jako elementy liniowo sprężyste. Podczas tworzenia modelu nie uwzględniono walcowniczych naprężeń własnych belki, które wg [5], [6] i [7] nie mają zasadniczego wpływu na końcowe naprężenia po gięciu na zimno. Zasymulowano gięcie kształtownika w celu uzyskania promienia wewnętrzznego 30 m, a następnie zamodelowano krzywiznę odwzorowaną za pomocą odcinków prostych. Kolejne etapy analizy modelu przedstawiono na rysunku 5. Porównanie wyników

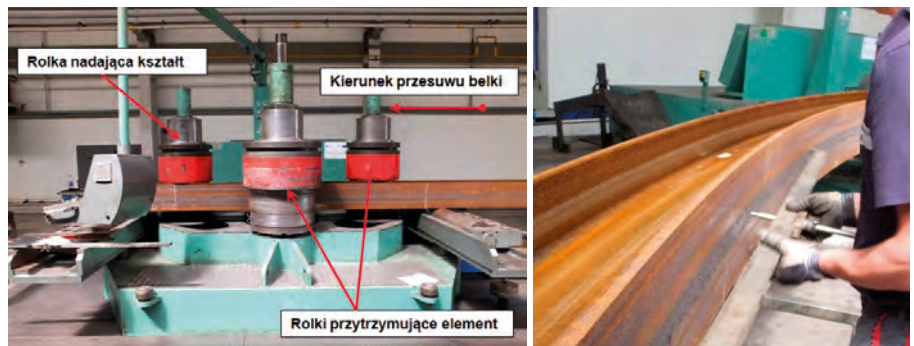
Analizy numeryczne wskazują, że gięcie punktowe wymusza większe miejscowe odkształcenia stali oraz miejscowo naprężenia własne osiągają większe wartości niż dla gięcia rolkowego.



Rys. 1. Schemat rolkowego formowania na zimno kształtownika [1]



Fot. 1. Punktowe gięcie na zimno. a) maszyna do punktowego gięcia na zimno belek, b) pomiar wygięcia (zdjęcia autora)



Fot. 2. Rolkowe gięcie na zimno: a) widok maszyny do gięcia, b) weryfikacja otrzymanego promienia gięcia (zdjęcia autora)

dla różnych promieni gięcia metodą rolkową przedstawiono w [8].

Po wygięciu kształtownika odczytano wartości naprężeń normalnych w pasach i śródku w miejscach występowania ich maksymalnych wartości. Odczytane wartości naprężeń zestawiono na rys. 4.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono dwa procesy technologiczne gięcia kształtowników gorącowalcowanych na zimno. Bardziej powszechnie stosowana jest technologia punktowego gięcia elementów. Analizy numeryczne wskazują jednak, że gięcie punktowe wymusza większe miejscowe odkształcenia stali oraz miejscowo naprężenia własne osiągają większe wartości niż dla gięcia rolkowego.

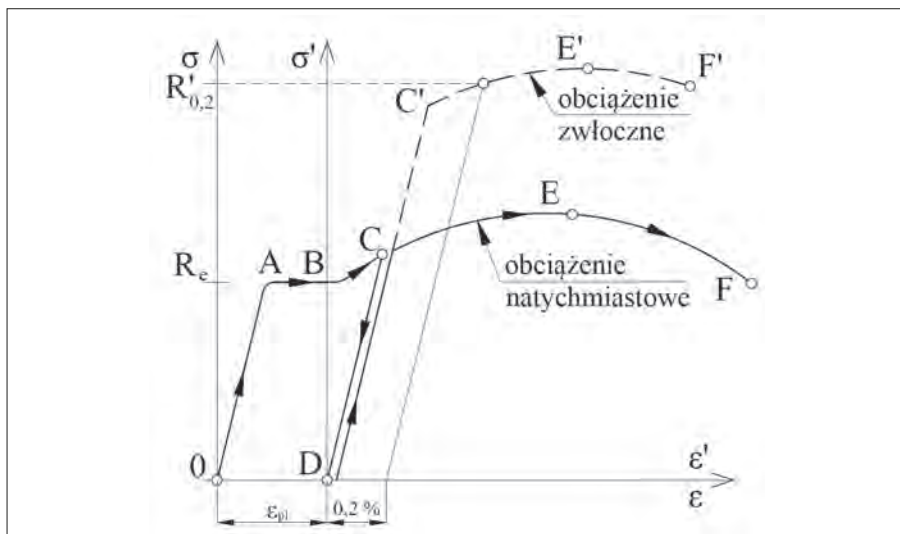
Jeśli projektowany element będzie docelowo gięty na zimno, to istotny jest dobór klasy jakości stali w celu doboru stali odpornej na kruche pękanie. Korzystając z procedury normowej [3], można określić minimalny dopuszczalny promień kształtowania na zimno.

Otrzymane rozkłady naprężeń własnych oraz ich wartości (rys. 4.) wykazują dużą zbieżność z wynikami uzyskanymi m.in. w [1], [5]. Dla przyjętego promienia gięcia wyznaczone naprężenia stanowią nawet do 50% granicy plastyczności stali (tabela 1.) i nie powinny być pomijane w procesie projektowania konstrukcji.

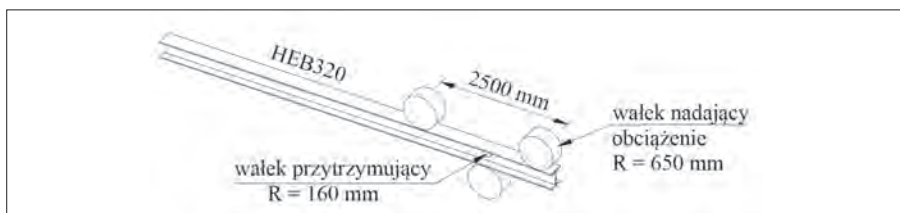
W dalszych analizach modele numeryczne powinny być rozbudowane o zróżnicowane rozstawy wałków skrajnych i zagęszczenie punktowego gięcia belki. Na Politechnice Wrocławskiej planowane są badania w kierunku pomiaru naprężeń własnych na elementach rzeczywistych poddanych gięciu na zimno, badania wytrzymałości stali w takich elementach i weryfikacja zmiany udarności stali. Zostanie również sprawdzony wpływ wyżarzania elementów wygiętych na zimno na właściwości stali.

Bibliografia

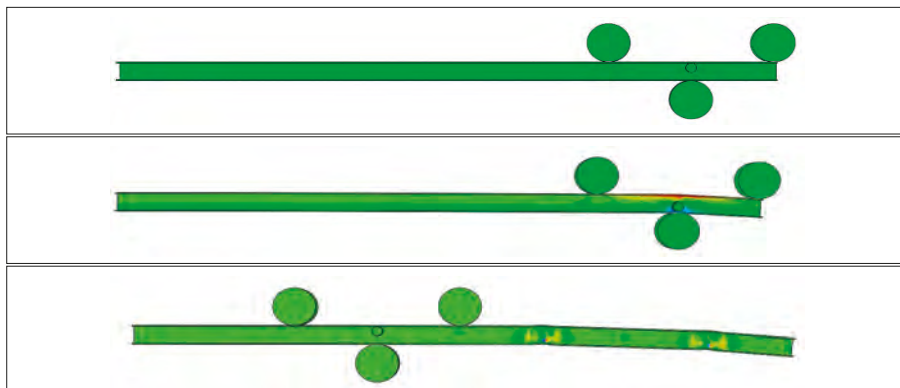
- [1] Spoorenberg R.C., Snijder H.H., Hoenderkamp J.C.D. Experimental investigation of residual stresses in roller bent wide flange steel sections. *Journal of Constructional Steel Research* 2010; 66(6):737–47.
- [2] Rykaluk K. 2016. Konstrukcje metalowe. Część I. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne.
- [3] PN-EN 1993-1-10. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową.
- [4] ABAQUS 6.14 Documentation.
- [5] Spoorenberg R.C., Snijder H.H., Hoenderkamp J.C.D. Finite element simulations of residual stresses in Toller bend wide flange sections. *Journal of Constructional Steel Research* 2011; 67:39–50.
- [6] O'Connor C. Residual stresses and their influence on structural stainless steel sections. *Journal of Constructional Steel Research* 2008; 197:268–78.
- [7] King C., Brown D., Design of curved steel. The steel Construction Institute; 2001.
- [8] Marcinczak K., Wojciech Lorenc. 2016. Modelowanie procesu gięcia na zimno dwuteowników walcowanych. „Materiały Budowlane” (5):101-102.



Rys. 2. Zależność naprężenia od odkształcenia materiału w układzie współrzędnych σ - ϵ przed zgięciem na zimno i σ' - ϵ' po zgięciu [2]



Rys. 3. Schemat modelu numerycznego



Rys. 4. Widok z boku modelu numerycznego: a) przed obciążeniem, b) w trakcie obciążania belki, c) po gięciu belki

Tabela 1. Naprężenia pozostałe po gięciu na zimno: a) dla promienia 30 m, b) dla gięcia punktowego

| a) gięcie rolkowe | b) gięcie punktowe |
|-------------------|--------------------|
| | |



Streszczenie. Przedstawiono zagadnienie gięcia punktowego i rolkowego na zimno dwuteowych kształtowników stalowych. Przeanalizowano konsekwencje, jakie niesie ze sobą plastyczne odkształcenie stali na zimno. Za pomocą analiz numerycznych wyznaczono naprężenia pozostałe po procesie gięcia na zimno w technologii punktowej i rolkowej.
Słowa kluczowe: gięcie na zimno, kruche pękanie, naprężenia własne, MES

Abstract. The issue of cold bending process of hot rolled sections was presented. Two technologies (point and continuous cold bending) were explained. The consequences of cold bending were analyzed. Using numerical analysis the stresses after cold bending were obtained.
Keywords: cold bending, brittle fracture, residual stresses, FEM