

Tytuł:

Zmiana właściwości wytrzymałościowych stali i układu naprężeń własnych po formowaniu na zimno dwuteowych kształtowników walcowanych ze stali S460M

Streszczenie:

Dwuteowe kształtowniki gięte na zimno stosowane są w budownictwie kubaturowym oraz mostowym jako belki z podniesieniem wykonawczym, przekrycia łukowe, krzywoliniowe formy architektoniczne a ostatnio również jako łukowe dźwigary mostowe w mostach typu *network arch*. Szeroki zakres zastosowań wymaga weryfikacji wpływu procesu formowania dwuteowników na zimno na stalowe elementy dwuteowe. W rozprawie doktorskiej podjęto zagadnienie oceny zmian właściwości mechanicznych stali i układu naprężeń własnych po formowaniu na zimno dwuteowych kształtowników walcowanych ze stali S460M.

Szerokie studia literaturowe, dotyczące zachowania się stali odkształconej na zimno wykazały, że istnieje potrzeba przeprowadzenia badań naukowych w celu określenia dopuszczalnego stopnia odkształcenia na zimno dla nowoczesnych stali drobnziarnistych oraz powstałych układów naprężeń własnych w elementach dwuteowych po procesie gięcia na zimno.

Analizy rozpoczęto od przeprowadzenia badań materiałowych próbek stalowych pobranych z dwuteowych elementów giętych rolkowo na zimno względem silnej osi przekroju. Przeanalizowano próbki o czterech różnych stopniach odkształcenia na zimno poddając je statycznej próbie rozciągania i ściskania oraz przeprowadzono badania udarności. Łącznie przebadano 80 próbek na rozciąganie, 60 próbek na ściskanie i 400 próbek do badań udarności. Podczas badań zweryfikowano również wpływ procesu wyżarzania stali odkształconej na zimno na jej parametry wytrzymałościowe. Na podstawie analiz oszacowano graniczne dopuszczalne odkształcenie stali na zimno, które pozwala zachować kryteria ciągliwości stali. Zaproponowano również model do oszacowania granicy plastyczności w różnych strefach w przekroju, w dwuteownikach giętych na zimno względem silnej osi.

Na podstawie wykonanych badań metodą otworkową (*hole drilling*) określono naprężenia walcownicze w prostym elemencie referencyjnym oraz naprężenia własne powstałe po gięciu na zimno. Badania przeprowadzono dla 32 punktów pomiarowych – 8 na elemencie referencyjnym i 24 na dwuteowych elementach giętych na zimno różnymi

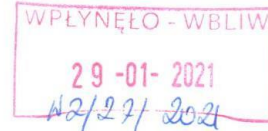
promieniami. Zbudowano również model numeryczny procesu rolkowego gięcia na zimno dwuteowników względem silnej osi w środowisku *Abaqus*. Badania i analizy numeryczne pozwoliły określić inne niż dla elementów prostych układy naprężeń własnych oraz poddać weryfikacji modele teoretyczne występujące w literaturze, które pozwalają oszacować naprężenia po gięciu na zimno.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono dwa badania w skali technicznej polegające na odwzorowaniu w warunkach laboratoryjnych procesów technologicznych stosowanych w przemyśle. Pierwsze badanie polegało na gięciu punktowym dwuteownika względem słabej osi grubościennego przekroju typu HD. Badanie nawiązywało do procesu wytwarzania łukowych dźwigarów mostowych w mostach typu *network arch*. Zastosowane podczas badania pomiary światłowodowe pozwoliły na analizę odkształceń stali na zimno na całej długości elementu oraz ocenę nakładania się stref uplastycznienia pomiędzy poszczególnymi punktami gięcia. Na podstawie eksperymentu wykonano walidację modelu numerycznego w programie *Abaqus*. Analizy numeryczne wykazały zbieżność z badaniami modelowymi. Potwierdziły uzyskane w badaniach doświadczalnych odkształcenia stali na zimno i trwałe ugięcia po odciążeniu. Skalibrowany model numeryczny posłużył do określenia naprężeń własnych w elemencie po gięciu na zimno względem słabej osi przekroju.

Drugim badaniem było wykonanie podniesienia wykonawczego dla belki mostowej o przekroju typu HL1100A. Podczas badania skupiono się na problemach technologicznych występujących podczas punkowego gięcia na zimno oraz zidentyfikowano zmienny poziom odkształceń stali po szerokości pasów. Badanie pozwoliło na określenie stopnia trwałego odkształcenia na zimno stali podczas wykonywania podobnych procesów technologicznych w praktyce.

Rozprawę zakończono wnioskami, które potwierdzają osiągnięcie celów naukowych i stanowią podstawy do określania wytycznych projektowych dla dwuteowych elementów giętych na zimno walcowanych ze stali S460M. W podsumowaniu autor przedstawił również, dalsze proponowane kierunki badań.

Krzysztof Marzec



Title:

Change in mechanical properties and residual stresses after cold bending of I-sections consisting of steel grade S460M

Summary:

Cold formed I-sections are used in cubature and bridge construction as cambered beam, arch roofs, curvilinear architectural forms and recently also as arched bridge girders in network arch bridges. A wide range of applications requires verification of the effect of the cold forming process of I-sections on steel sections. In the dissertation, the issue of change in material properties of steel and the distribution of residual stresses after cold bending of steel grade S460M was discussed.

Extensive literature studies on the behavior of cold-deformed steel have shown that there is a need to conduct scientific research to determine the acceptable degree of cold deformation for modern steels, and that the new distribution of residual stresses in I-sections after the cold bending process should be determined.

The analyzes was began with material tests of steel samples taken from cold bended I-sections about strong axis. Samples with four different degrees of cold deformation were analyzed, subjected to a static tensile and compression test, and impact tests were carried out. A total of 80 tensile samples, 60 compression samples and 400 samples for impact tests were tested. During the tests, the influence of the annealing process of cold-deformed steel on mechanical properties was also verified. On the basis of the analyzes, the limit allowable cold deformation of the steel was estimated, which allows to achieve the steel ductility criteria. The model to determine the yield point in various zones in the cross-section, in cold-bent I-sections with respect to the strong axis was proposed.

On the basis of the tests performed by hole drilling method, the residual stresses were determined in a straight reference element and in curved elements. The tests were carried out for 32 measuring points - 8 on the reference element and 24 on I-shaped elements cold bent with different radius. A numerical model of the cold roll bending process of I-sections in respect to the strong axis in the Abaqus software was also made.

Numerical tests and analyzes allowed to determine different than for simple elements distribution of residual stresses and to verify theoretical models found in the literature, which allow to estimate the stresses after cold bending.

The dissertation presents two tests on a technical scale, consisting in mapping technological processes used in the industry in laboratory conditions. The first test involved point bending an I-section with respect to the weak axis of a thick-walled HD section. The test referred to the process of producing arched bridge girders in network arch bridges. The fiber optic measurements used during the study allowed for the analysis of cold deformation of the steel along the entire length of the element and the assessment of the plastic zones between individual bending points. Based on the experiment, the numerical model was validated in the Abaqus program. Numerical analyzes confirmed the cold deformation of steel obtained in experimental tests and permanent deflections after unloading. The calibrated numerical model was used to determine the residual stresses in the element after cold bending in relation to the weak axis of the cross-section.

The second test was the performance of cambering in laboratory conditions for a bridge beam with a HL1100A cross-section. The research focused on technological problems occurring during point cold bending and identified a variable level of deformation along the width of the flange. The study allowed to determine the degree of permanent cold deformation of steel during the performance of similar processes in practice.

The dissertation finishes with conclusions which confirm the thesis and constitute the basis for determining design guidelines for cold-bended I-section consisting of steel grade S460M. In the summary, the author also presented further proposed research directions.

Krzysztof Marand