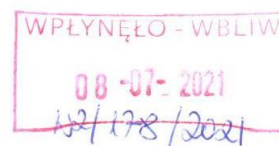


Prof. dr hab. inż. Marian GIŻEJOWSKI, prof. zw. PW
Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej
al. Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa
e-mail: m.gizejowski@il.pw.edu.pl

Warszawa, 5.07.2021 r.



Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa MARCINCZAKA

pt.

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

1. Podstawa opracowania

Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Wrocławskiej z dnia 24 lutego 2021 roku (pismo przewodniczącego dr hab. inż. Adriana RÓŻAŃSKIEGO, profesora Politechniki Wrocławskiej, z dnia 1 marca 2021 roku).

2. Zawartość rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa została przygotowana przez mgr inż. Krzysztofa MARCINCZAKA pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha LORENCA jako promotora oraz dr inż. Sławomira ROWIŃSKIGO jako promotora pomocniczego. Zawarta jest na 209 stronach i podzielona została na 10 rozdziałów, z których dwa ostatnie to spis pozycji bibliograficznych zawierający 93 pozycje (bez podziału na literaturę oraz normy i wytyczne) oraz streszczenia w językach polskim i angielskim.

Rozdział 1: Wstęp, o objętości 7 stron, zawiera informacje dotyczące motywacji podjęcia tematyki gięcia na zimno walcowanych kształtowników stalowych, a także przedmiot i zakres pracy oraz symbole i oznaczenia stosowane w rozprawie. Recenzent uważa, że podrozdział 1.2, dotyczący zakresu opracowania, należałoby uzupełnić o bardziej szczegółowy opis dotyczący wykazania jego związku z celem rozprawy oraz umieścić w rozdziale 3. Podrozdział 1.3 dotyczący najważniejszych symboli i oznaczeń należałoby wyłączyć i umieścić po spisie treści, bez nadawania mu rangi rozdziału. W rozprawie, począwszy od str. 7, występuje określenie „dwuteowe kształtowniki gięte na zimno”, lub mu podobne określenia, bez bezpośredniego odniesienia, że chodzi o „dwuteowe kształtowniki walcowane gięte na zimno”. Termin „kształtowniki gięte” ma inne znaczenie, gdyż dotyczy stalowych kształtowników giętych (zimnogiętych) z blach.

Rozdział 2: Podsumowanie stanu wiedzy, o objętości 50 stron (w tym 59 rysunków i 9 tablic), zawiera omówienie aktualnego stanu wiedzy w zakresie gięcia na zimno walcowanych kształtowników stalowych oraz problemów związanych z określeniem wpływu technologii gięcia na zimno na właściwości stali wyrobu walcowanego na gorąco oraz ewolucję stanu technologicznych naprężeń własnych walcowniczych, następującą w wyniku

kolejnego procesu technologicznego, jakim jest gięcie na zimno. Rozdział zawiera analizę i syntezę szczegółowego rozpoznania literatury oraz opatrzony jest podsumowaniem i wnioskami z analizy i syntezy aktualnego stanu wiedzy. Zakończenie rozdziału podsumowaniem uważam za zasadne i pożądane w każdej rozprawie doktorskiej, gdyż ułatwia czytelnikowi ocenę celowości etapowania badań podjętych przez Autora, które prezentowane są w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Rozdział 3: Cele naukowe pracy, o objętości 1/2 strony stanowi uszczegółowienie podrozdziału 1.2. Autor sformułował 5 szczegółowych celów naukowych. Trzy pierwsze dotyczą wpływu promienia gięcia na zimno dwuteowników walcowanych ze stali S460 M na: a) właściwości mechaniczne, w tym określenie dopuszczalnej wartości stopnia formowania na zimno (DCF) powyżej której degradacyjny wpływ gięcia na zimno na cechy mechaniczne kształtownika walcowanego należy uwzględnić, b) ewolucję naprężeń własnych walcowniczych w procesie gięcia na zimno kształtownika walcowanego i wyznaczenie rozkładu oraz wartości szczytowych naprężeń własnych w kształtowniku po procesie gięcia na zimno. Czwarty cel jest sformułowany w sposób mało zrozumiały, gdyż Autor pisze, że chodzi o „weryfikację poziomów odkształceń podczas doświadczalnych prób ...”. Terminy weryfikacja i walidacja mają ugruntowane znaczenie i dotyczą: weryfikacja – porównywania wyników otrzymanych z różnych modeli teoretycznych, analitycznych i/lub numerycznych, walidacja zaś – porównywania wyników otrzymanych z modeli teoretycznych i modeli fizycznych badanych w laboratorium lub in situ. Czy Autorowi chodziło o porównanie wartości odkształcenia w charakterystycznych przekrojach kształtownika w trakcie procesu gięcia z wynikami predykcji na podstawie modelu teoretycznego? Piąty cel jest sformułowany ogólnie i mieści w sobie pierwsze 4 cele szczegółowe, a więc zdaniem recenzenta cel ten powinien być umieszczony w tekście wyjaśniającym, przed podaniem celów szczegółowych. Recenzent uważa, że sformułowanie celu i zakresu rozprawy jest jednym z najważniejszych elementów rozprawy. Bardziej logicznym podejściem byłoby połączenie treści rozdziałów 1.2 i 3 oraz rozbudowanie zawartości do objętości kilku stron, aby nadać odpowiednią rangę temu elementowi rozprawy.

Rozdział 4: Badania materiałowe stali odkształconej na zimno, o objętości 39 stron (w tym 38 rysunków i 10 tablic), jest pierwszym z 4 następujących po sobie, zasadniczych rozdziałów rozprawy. Autor przedstawił w tym rozdziale sposób przygotowania elementów do badań gięcia na zimno oraz pobrania próbek do badań materiałowych, dotyczących statycznych prób rozciągania i ściskania realizowanych w temperaturze pokojowej oraz prób udarności metodą Charpy'ego w temperaturze -20°C (badania udarności zrealizowano też w temperaturze pokojowej na wybranych próbkach referencyjnych). Próbki pobrano z pasa (po jednej w strefach na końcach pasów oraz po jednej w strefach styku pasów i środka) oraz ze środka (po jednej w obu strefach między środkiem wysokości kształtownika i wyokrągleniem między środkiem i pasami). Próbki pobrano z elementów w stanie przed formowaniem na zimno (DCF=0,00%) oraz po formowaniu na zimno z zastosowaniem 4 różnych promieni gięcia: R=2460 mm (DCF=6,50%), R=4460 mm (DCF=3,59%), R=6610 mm (DCF=2,42%) i R=11900 mm (DCF=1,33%). W badaniach materiałowych dotyczących próby statycznego rozciągania uwzględniono 2 sytuacje technologiczne: stan naturalny (próbki pobrane z

elementów próbnych przed gięciem i po gięciu na zimno, ale bez dodatkowych zabiegów technologicznych) oraz stan po dodatkowym wyżarzaniu normalizującym próbek pobranych z elementów przed gięciem na zimno oraz po gięciu. Wyniki przedstawiono na wykresach naprężenie-odkształcenie, z podaniem miejsca pobrania próbki (pas rozciągany podczas gięcia na zimno, pas ściskany podczas gięcia na zimno oraz średnik w strefach rozciąganej i ściskanej). Wyznaczono umowną granicę plastyczności na poziomie 0,2% oraz wytrzymałość na rozciąganie.

Badania udarności w temperaturze -20°C zrealizowano na próbkach w 2 sytuacjach technologicznych, jak w wypadku statycznej próby rozciągania. Przedstawiono postacie złomów oraz na wykresach wyniki dotyczące energii łamania KV [J] w zależności od miejsca pobrania próbki. Dokonana w rozprawie ocena zdolności stali do zniszczenia w formie plastyczno-kruchoj na podstawie próby Charpy'ego jest skromna. Próba udarności Charpy'ego pozwala na ocenę zdolności stali, w danej sytuacji technologicznej, do absorpcji energii dynamicznej w obecności anizotropii strukturalnej, a także na określenie udziału przełomu plastycznego w przekroju złamanej próbki SFA (*Shear Fracture Area*) i wielkości rozszerzenia poprzecznego LE (*Lateral Expansion*). Tym samym pozwala na ocenę zdolności samohamowania pęknięć inicjowanych dynamicznie. Norma PN-EN ISO 148-1:2017 formalizuje stosowanie wskaźników SFA i LE jako miernika ciągłości przełomu w materiałach, w których sama ocena SFA nie jest wystarczająco dokładna (por. też M. Stankiewicz, G. Holloway, A. Marshall, Z. Zhang, B. Ślęzak „Próba udarności Charpy'ego i parametr Lateral expansion w ocenie materiałów spawalniczych dla potrzeb kriogeniki”, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 11/2012).

Rozdział 4 kończy się analizą wyników i wnioskami z badań materiałowych. Zdaniem recenzenta, w rozprawie brakuje tabelarycznego zestawienia wyników dotyczących właściwości materiału w badanych stanach technologicznych (np. w załączniku na końcu rozprawy), takich jak m. in. modułu sprężystości E oraz granicy plastyczności f_y z prób rozciągania i ściskania oraz wytrzymałości na rozciąganie f_u , z podaniem chociażby wartości średnich z wyników otrzymanych w badaniach materiałowych. Brak tych danych utrudnia ocenę poprawności propozycji Autora ujętej w podrozdziale 4.6.4, która dotyczy wpływu gięcia na zimno na parametry wytrzymałościowe stali, określane na podstawie badań materiałowych próbek pobranych z wyrobów „prostoliniowych” (dostarczonych przez hutnictwo). Z wykresów 4.30-4.35 wynika, że krzywe $(f_{u,r}/f_{y,r})/(f_{u,s}/f_{y,s})$ w funkcji R/h są „wznoszące”, za wyjątkiem krzywej dotyczącej próbek pobranych ze skrajnych stref pasa ściskanego w procesie formowania na zimno. Z wcześniejszych rozważań wynika, że charakterystyki naprężenie-odkształcenie oceniane z prób statycznego rozciągania i ściskania są odmienne (por. tab. 4.4 na str. 75, rys. górny lewy oraz tab. 4.6 na str. 82, rys. dolny lewy). Duży wpływ na ww. przebieg zależności może mieć przyjęcie wartości cech mechanicznych w pasie, który w procesie formowania na zimno jest ściskany.

Ocena modelu teoretycznego Autora, wzór (4.3), nie wydaje się zadowolająca, gdyż 7 punktów leży poza obszarem wyznaczonym przez granice (+/-) 10%, 5 poza obszarem (0-10)% po stronie niebezpiecznej (predykcja teoretyczna przewyższa wartość uzyskaną z badań materiałowych), 3 zaś poza obszarem (0-20)% po stronie niebezpiecznej. Ponieważ brak jest identyfikacji punktów w zależności od miejsca pobrania próbek w przekroju, nie można stwierdzić, w jakim obszarze należy szukać możliwości „poprawienia” modelu

teoretycznego. Poza tym, zaproponowany sposób budowy wzorów, polegający na wprowadzeniu „współczynnika wygięcia R/h ” nie jest dogodnym z uwagi na fakt, że jego wartość zmienia się teoretycznie w granicach od zera do nieskończoności. Znacznie dogodniej wprowadzić parametr unormowany, zmieniający się w granicach od zera do jedności, np. $(1+R/h)^{-1}$. Poza tym, w rozprawie operuje się już parametrem $h/2R$, który wyrażony w procentach oznacza stopień formowania na zimno. Jakże jest uzasadnienie konieczności wprowadzenia kolejnego parametru R/h , stanowiącego skalowaną odwrotność ilorazu tych samych zmiennych?

Rozdział kończy się dyskusją dotyczącą ograniczenia stopnia gięcia na zimno. Oceniając rozdział 4 mogę stwierdzić, że zawiera wyniki kompleksowych badań materiałowych kształtowników dwuteowych giętych na zimno, w zakresie zarówno prób statycznych jak i udarowych. Na podstawie zrealizowanych badań opracowano wstępne modele obliczeniowe oraz sformułowano szereg wniosków praktycznych. Zgromadzono materiał do dalszych, bardziej wnikliwych analiz w celu zbudowania modeli obliczeniowych do predykcji właściwości mechanicznych stali w kształtownikach walcowanych po ich gięciu na zimno. Analizy powinny dotyczyć uwzględnienia wpływu wielokierunkowego stanu naprężenia oraz bardziej szczegółowej klasyfikacji złomów i oceny czynników wpływających w ujemnych temperaturach na plastyczno-krucho formy zniszczenia stali kształtowników walcowanych, po ich formowaniu na zimno.

Rozdział 5: Wyznaczanie i analiza naprężeń własnych w kształtowniku giętym na zimno, o objętości 22 stron (w tym 17 rysunków i 4 tablice), przedstawiono tematykę naprężeń własnych, będących wynikiem dwóch procesów technologicznych, mianowicie walcowania na gorąco dwuteowego kształtownika stalowego, a następnie gięcia na zimno w płaszczyźnie większej bezwładności przekroju. W nawiązaniu do tytułów rozdziału 6 oraz 7 recenzent uważa, że tytuł niniejszego rozdziału należałoby uszczegółowić, podając płaszczyznę większej bezwładności przekroju jako płaszczyznę gięcia oraz proces technologiczny gięcia jako gięcie rolkowe na zimno. W wypadku elementów stalowych rozważanych w rozprawie, proces technologiczny nie kończy się na etapie wytworzenia wyrobu, jakim jest „prostoliniowy” kształtownik dwuteowy, gdyż kontynuacją procesu technologicznego jest gięcie wyrobu na zimno w celu uzyskania finalnej geometrii krzywoliniowej. W ciągu technologicznym dwóch różnych procesów wytwarzania, walcowania na gorąco oraz formowania na zimno, powstają odkształcenia plastyczne, w których wyniku walcowany kształtownik krzywoliniowy obciążony jest naprężeniami własnymi, będącymi wynikiem ewolucji bryły naprężeń własnych od stanu wyjściowego po walcowaniu do stanu finalnego, po gięciu na zimno. Problem jest złożony, zarówno od strony budowy modeli teoretycznych, które wymagają wieloetapowych, zaawansowanych analiz numerycznych termo-mechano-sprężysto-plastycznych metodą elementów skończonych, jak i doświadczalnego wyznaczenia przebiegu naprężeń własnych w ściankach dwuteownika. Autor połączył metody doświadczalne i numeryczne w celu wyznaczenia naprężeń własnych technologicznych, których poprawne oszacowanie ma decydujący wpływ na dokładność statecznościowej oceny nośności konstrukcji z kształtowników walcowanych giętych na zimno. W badaniach doświadczalnych wykorzystano metodę otworkową, przyjmując 3 punkty nawiercenia w pasach. W środku przyjęto jeden punkt w środku wysokości kształtownika przed

formowaniem na zimno, po gięciu na zimno zaś 2 punkty w równych odległościach na odcinku średnika między wewnętrzną powierzchnią pasów. Wyznaczono rozkład naprężeń własnych walcowniczych w odniesieniu do kształtownika „prostoliniowego” (wyrobu stalowego), a następnie badania powtórzono w odniesieniu do elementów o różnym promieniu gięcia na zimno. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów odcinkowo-liniowych i porównano ze standardowymi rozkładami naprężeń własnych, zaczerpniętymi z literatury (rozkład naprężeń według Timoshenki oraz Spoorenberga). Uzupełnieniem badań doświadczalnych była budowa modelu numerycznego procesu gięcia rolkowego na zimno w programie Abaqus, bez modelowania procesu walcowania wyrobu wyjściowego. Należy w tym miejscu dodać, że od ponad dwóch dekad prowadzone są badania związane ze skończeniem elementowym modelowaniem procesu walcowania na gorąco (por. np. M.A. Cavaliere, M.B. Goldschmit, E.N. Dvorkin: „Finite element analysis of steel rolling processes”, *Computers & Structures*, Volume 79, Issues 22–25, 2001, 2075-2089). Ponieważ symulacje numeryczne dwuetapowego procesu technologicznego są złożone, Kandydat skupił się na modelowaniu fazy technologicznego gięcia na zimno. W rozprawie opisano założenia wyjściowe oraz uproszczenia związane z „przejazdem belki” w celu uzyskania oczekiwanego promienia gięcia kształtownika. Nie podano sposobu uwzględnienia rozkładu naprężeń walcowniczych. Recenzent zakłada, że zadano je a priori jako pole wstępnych naprężeń w podobny sposób, jak w wypadku modelu numerycznego gięcia kształtownika w płaszczyźnie mniejszej bezwładności przekroju (por. rozdział 6, str. 167). Bardziej logicznym ujęciem problematyki modelowania walcowniczych naprężeń własnych byłoby przedstawienie opisu sposobu modelowania tych naprężeń w rozdziale 5, a w rozdziale 6 powołanie się na ten opis. Otrzymane rozkłady naprężeń własnych po numerycznej symulacji technologicznego procesu gięcia porównano w rozkładami proponowanymi przez Timoshenkę i Spoorenberga. Podsumowując należy stwierdzić, że Autor podjął próbę stworzenia uproszczonego modelu numerycznego do jakościowej oceny ewolucji rozkładu naprężeń własnych. Z uwagi na przyjęte uproszczenia modelu numerycznego, nie dokonano jego walidacji. Rozdział kończy się analizą wyników badań teoretyczno-doświadczalnych związanych z modelowaniem ewolucji rozkładu naprężeń własnych w dwuetapowym procesie technologicznym wytwarzania krzywoliniowych dwuteowników walcowanych, giętych na zimno w płaszczyźnie większej bezwładności przekroju. Wyjaśniono, że opracowany model numeryczny wymaga dalszego uszczegółowienia, a przedstawione analizy pozwoliły na ukierunkowanie dalszych badań w celu zbliżenia modelu do rzeczywistości. Ważnym wynikiem zrealizowanych prac naukowych jest potwierdzenie, na podstawie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych, że rozkład naprężeń własnych pozostających po dwuetapowym procesie technologicznym walcowania i gięcia na zimno różni się istotnie od rozkładu naprężeń własnych walcowniczych, co może mieć istotny wpływ na ocenę stateczności dźwigarów krzywoliniowych, w szczególności łukowych. Fakt ten nie był brany pod uwagę w symulacjach numerycznych stateczności giętno-skrętnej łukowych konstrukcji realnych, prowadzonych w ujęciu technicznej utraty stateczności ustrojów imperfekcyjnych, modelowanych powłokowymi lub bryłowymi elementami skończonymi. Symulacje numeryczne zrealizowane w rozprawie uzupełniły w zakresie ilościowym wnioski o charakterze jakościowym, formułowane na podstawie badań doświadczalnych stateczności łuków kształtowanych na zimno.

Rozdział 6: Punktowe gięcie na zimno kształtownika względem słabej osi, o objętości 51 stron (w tym 59 rysunków i 17 tablic), obejmuje zagadnienia związane z nadawaniem walcowanemu elementowi dwuteowemu wstępnej krzywizny w płaszczyźnie mniejszej bezwładności przekroju. Z uwagi na płaszczyznę gięcia, element jest niewrażliwy na przestrzenną formę utraty stateczności, a naprężenia własne technologiczne pozostające po procesie gięcia na zimno wpływają na kształt nieliniowej ścieżki równowagi i osiągnięcie punktu granicznego na tej ścieżce. Wyznaczono analitycznie przemieszczenia belki idealnej w zakresie sprężysto-plastycznego zginania (model materiału idealnie-sprężysto-plastyczny) oraz oszacowano trwałe ugięcie po odciążeniu ze stanu pełnego uplastycznienia. Model analityczny szacowania trwałego ugięcia po plastycznej deformacji mechanicznej został zweryfikowany na podstawie wyników z symulacji numerycznej z wykorzystaniem uproszczonego modelu MES. Dokonano jakościowej walidacji uproszczonego modelu MES. Do tego celu zaprojektowano i wykonano badania doświadczalne gięcia na zimno dwuteownika typu HD w płaszczyźnie mniejszej bezwładności przekroju. Przedstawiono wyniki z rejestracji dokonanej za pomocą czujników indukcyjnych (przemieszczenia) oraz czujników elektrooporowych (odkształcenia w wybranych punktach przekroju) i światłowodów (odkształcenia w wybranych włóknach na długości elementu) w procesie zadawania siły na kolejnych etapach gięcia. Symulacje numeryczne odtwarzające wyniki zrealizowanych badań doświadczalnych wykonano wielokrotnie, wykorzystując 4 różne modele materiału: 2 modele dwuliniowe idealnie-sprężysto-plastyczne o nominalnej wartości modułu sprężystości oraz nominalnej wartości granicy plastyczności (M-1) i granicy plastyczności równej wartości średniej z badań materiałowych (M-2), model *engineering stress-strain*, odtwarzający krzywą naprężenie-odkształcenie z badań materiałowych (M-3) oraz model *true stress-strain*, wynikający z przekształcenia modelu inżynierskiego w model rzeczywisty, operujący na aktualnych miarach odkształceń i naprężeń (M-4). Modele numeryczne zbudowane były w dwóch wariantach: bez uwzględnienia naprężeń walcowniczych oraz z uwzględnieniem naprężeń własnych walcowniczych w podobny sposób, jak w wypadku modelu numerycznego gięcia kształtownika w płaszczyźnie większej bezwładności przekroju. Wyniki zostały przedstawione na wykresach przebiegu odkształceń wybranych włókien przekroju na długości elementu. Przedstawiono również przebiegi wypadkowych naprężeń własnych po gięciu na zimno na wysokości przekroju w sytuacjach modelowania bez uwzględnienia ewolucji naprężeń własnych walcowniczych. Recenzent zakłada, że uwzględniono ewolucję naprężeń własnych walcowniczych podczas procesu gięcia na zimno. W rozprawie nie pokazano przebiegu naprężeń własnych na kierunku drugiego wymiaru przekroju. Rozdział kończy się analizą wyników i wnioskami dotyczącymi profilu trwałych odkształceń kształtownika walcowanego po jego formowaniu na zimno.

Rozdział 7: Punktowe gięcie na zimno kształtownika względem silnej osi, o objętości 15 stron (w tym 22 rysunki i 2 tablice), obejmuje zagadnienia punktowego gięcia na zimno wysokiego kształtownika stalowego HL 1100A w płaszczyźnie większej bezwładności w celu nadania przeciwstrzałki łukowej. Podobnie jak w rozdziale 6, wykonano badania doświadczalne z pomiarem ugięć za pomocą czujników indukcyjnych oraz rozkładu odkształceń na długości elementu za pomocą światłowodów DFOS. Tytuł podrozdziału 7.3.3

sugeruje, że zastosowano również czujniki elektrooporowe do punktowego pomiaru odkształceń w przekroju. W rozdziale nie podano schematu rozmieszczenia czujników elektrooporowych. Po lekturze rozdziału 7 pojawia się pytanie, czy rejestrowano wyniki z czujników tensometrycznych? Recenzent wnioskuję, że Autor sposobem kopiuj-wklej przeniósł tytuł podrozdziału 6.4.3 „Wyniki z czujników indukcyjnych oraz pomiarów tensometrycznych” do rozdziału 7, nadając mu numer 7.3.3, ale nie usunął fragmentu „oraz pomiarów tensometrycznych”. Rozdział kończy się analizą wyników i wnioskami z badań doświadczalnych. Zakres badań ujęty w tym rozdziale jest najskromniejszy, w porównaniu z poprzednimi 3 rozdziałami. W rozdziale nie przedstawiono żadnych symulacji numerycznych.

Rozdział 8: Podsumowanie i wnioski końcowe, o objętości 9 stron, zawiera krótkie opisy badań ujętych w poszczególnych rozdziałach rozprawy oraz szczegółowe wnioski w liczbie 20, które uwiarygodniły zrealizowanie celów naukowych badań, które sformułowane zostały na wstępie rozprawy. Rozdział kończy się sformulowaniem dalszych kierunków badań w tematyce objętej rozprawą.

Recenzent ocenia pozytywnie wnioski z badań zrealizowanych na potrzeby rozprawy. W opinii recenzenta, zamierzony cel naukowy rozprawy został osiągnięty.

3. Ogólna ocena rozprawy

3.1. Tematyka

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy aktualnej tematyki badań związanych z opisem zmian właściwości mechanicznych oraz ewolucji rozkładu naprężeń własnych w kształtownikach walcowanych na gorąco w wyniku procesu ich gięcia na zimno. Stalowe dwuteowniki walcowane gięte na zimno stosowane są w budownictwie kubaturowym dużych rozpiętości i w konstrukcjach mostowych. W okresie ostatnich kilku dekad można zaobserwować zauważalny wzrost zainteresowania konstrukcjami z giętych na zimno kształtowników walcowanych ze stali o polepszonych właściwościach mechanicznych. W krajowym budownictwie zaczęto stosować na szerszą skalę gięte na zimno kształtowniki walcowane ze stali S460M w obiektach mostowych typu *network arch*. Zagadnienia poruszone w rozprawie, dotyczące kompleksowych badań właściwości mechanicznych nowych gatunków stali w giętych na zimno kształtownikach walcowanych mieszczą się bez wątpienia w nurcie aktualnych zagadnień badawczych i są ważne z punktu widzenia nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych w budownictwie stalowym.

Autor dokonał syntezy aktualnego stanu wiedzy z zakresu tematyki objętej rozprawą, uwzględniając literaturę naukowo-techniczną oraz normy i wytyczne projektowania. Przeprowadził obszerne badania doświadczalne właściwości mechanicznych stali oraz rozkładu naprężeń własnych w kształtownikach walcowanych ze stali S460M, z zastosowaniem różnych promieni gięcia na zimno. Wyniki badań uzyskane w odniesieniu do wyrobów walcowanych giętych na zimno odnosił do wyników dotyczących wyrobu wyjściowego „prostoliniowego”.

Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań i analiz sformułował szereg wniosków i zaleceń o charakterze ogólnym, które stanowią oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny doktryzowania i wyznaczają kierunki dalszych badań.

3.2. Ocena wartości naukowej

Materiał zawarty w rozprawie jest obszerny i wartościowy, przede wszystkim z punktu widzenia zgromadzonych wyników badań doświadczalnych dotyczących cech mechanicznych, naprężeń własnych oraz modelowania technologicznych procesów gięcia na zimno. Wyniki badań materiałowych stworzyły podstawy naukowe do budowy modeli obliczeniowych uwzględniających wpływ gięcia na zimno w dwóch aspektach:

- a) zmiany właściwości mechanicznych stali w przekroju w zależności od promienia gięcia w płaszczyźnie większej bezwładności przekroju i stanu naprężenia wprowadzonego podczas gięcia (ściskanie, rozciąganie),
- b) zmiany pot technologicznych naprężeń własnych w przekroju po procesie gięcia na zimno w płaszczyźnie większej bezwładności przekroju.

Ten obszar badań uważam z najbardziej wartościowy, gdyż badania zostały przemyślane, a także zaprojektowane oraz zrealizowane z dużą dozą dociekliwości naukowej. Szkoda, że nie przeprowadzono badań materiałowych na próbkach z kształtownika po gięciu w płaszczyźnie mniejszej bezwładności przekroju, tym bardziej, że doświadczalne badania stanu przemieszczenia oraz odkształcenia w wybranych włóknach przekroju w procesie technologicznym gięcia na zimno dotyczyły również tej płaszczyzny gięcia.

Wyniki badań dotyczące monitorowania przemieszczeń dwuteownika oraz odkształceń wybranych włókien przekroju za pomocą czujników elektrooporowych i światłowodowych stworzyły podstawy naukowe do budowy modeli numerycznych procesu gięcia na zimno w płaszczyźnie mniejszej bezwładności przekroju i ich walidacji na podstawie wyników badań doświadczalnych realizowanych w skali technicznej. Badania doświadczalne gięcia na zimno kształtownika walcowanego w płaszczyźnie większej bezwładności przekroju nie zostały uzupełnione o model numeryczny.

Autor porusza szereg ważnych wątków, których rozstrzygnięcie ma istotne znaczenie praktyczne. Mnogość poruszanych wątków sprawia jednak, że niektóre z nich są omawiane wycinkowo i dotyczyły, na różnych etapach badań, elementów o innych cechach przekroju (HEB, UC, HL). Autor nie dokonał analizy i syntezy problemów naukowych występujących w konstrukcjach z kształtowników walcowanych giętych na zimno pod kątem wyboru najważniejszych problemów i realizacji programu badań dedykowanego wybranym problemom. Dotyczy to przede wszystkim związku badań doświadczalnych z modelowaniem numerycznym. Walidacja hierarchiczna modelu numerycznego umożliwiłaby ocenę wiarygodności tego modelu i stworzyłaby możliwość wykorzystania tego modelu do analiz parametrycznych. Analizy parametryczne umożliwiłyby z kolei na uzyskanie informacji na temat wpływu różnych czynników, np. płaszczyzny i promienia gięcia, a także technologii gięcia na ewolucję cech mechanicznych oraz naprężeń własnych podczas technologicznego procesu gięcia na zimno kształtownika walcowanego. Podejście polegające na precyzyjnie zaprojektowanych badaniach doświadczalnych, które pozwalają na zdobycie szczegółowych informacji do hierarchicznej walidacji modelu numerycznego jest obecnie przyjmowane jako standardowe w badaniach naukowych. Wykorzystanie zwalidowanego modelu numerycznego do szerszych analiz parametrycznych w celu optymalizacji istniejących rozwiązań i procesów technologicznych lub do tworzenia innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych jest coraz szerzej stosowane w budownictwie.

Podsumowując, poruszana w rozprawie problematyka naukowa obejmuje swym zakresem zagadnienia związane z badaniami doświadczalnymi, symulacjami numerycznymi oraz rozwiązaniami analitycznymi, w różnym stopniu odnoszące się do oceny cech mechanicznych stali w stanie potechnologicznym, rozkładu naprężeń własnych i doboru parametrów technologii gięcia na zimno w zależności od projektowanej geometrii finalnej. Recenzent uważa, że mimo podniesionych w recenzji uwag dotyczących projektowania zakresu badań, cele badawcze zarysowane przez Kandydata na wstępie zostały potwierdzone wynikami jego dociekań naukowych. Autor zaprojektował i przeprowadził badania doświadczalne, opracował w rozprawie numeryczne i analityczne modele obliczeniowe, dokonał porównania wyników badań doświadczalnych i numerycznych w wybranych punktach modeli. W dobrym stopniu opanował współczesne narzędzia i techniki badawcze, rozszerzył analizy o nowe elementy i wykazał, że przy ich pomocy można poszerzyć wiedzę z zakresu wpływu technologicznego procesu gięcia na zimno stalowych dwuteowników walcowanych na właściwości mechaniczne, ewolucję naprężeń własnych oraz stopień trwałych odkształceń potechnologicznych.

3.3. Ocena strony formalnej

Rozprawa nie budzi większych zastrzeżeń od strony poprawności użytego języka oraz terminologii naukowo-technicznej. Na podkreślenie zasługuje bardzo czytelne przedstawienie wyników badań na wykresach. Zauważone usterki tekstu nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Zdaniem recenzenta, każdy z rozdziałów zawierających wyniki dociekań naukowych Autora powinien kończyć się podsumowaniem i wnioskami z analiz i badań. Ten element rozprawy pozwala na ocenę dojrzałości naukowej badacza.

4. Uwagi szczegółowe do rozprawy

W uwagach szczegółowych podano jedynie najważniejsze, zdaniem recenzenta, usterki tekstu, zarówno redakcyjne jak i o charakterze merytorycznym.

Str. 41, w. 1-2 od góry

Termin „krzywe materiałowe” nic nie mówi, chodzi krzywe ilustrujące zarejestrowany w badaniach materiałowych przebieg zależności naprężenie-odkształcenie.

Str. 44, w. 3 od góry, a także w dalszej części rozprawy

Do opisu miejsca pobrania próbek do badań materiałowych Autor stosuje wymiennie określenia pas górny przekroju dwuteowego / pas przekroju rozciągany podczas gięcia oraz pas dolny / pas przekroju ściskany podczas gięcia. Z punktu widzenia celu pracy ważniejszym elementem charakteryzującym próbkę jest naprężenie generowane w miejscu pobrania próbki podczas procesu gięcia na zimno, tzn. próbka pobrana z pasa rozciąganego podczas formowania na zimno, próbka pobrana z części środkowej rozciąganej podczas formowania na zimno, próbka pobrana z pasa ściskanego podczas formowania na zimno, próbka pobrana z części środkowej ściskanej podczas formowania na zimno, a nie próbka z pasa górnego, próbka z górnej części środkowej, próbka z pasa dolnego, próbka z dolnej części środkowej, itd.

Str. 47, rys. 2.46

Czy wykresy naprężeń własnych dotyczą stanu wyjściowego beznapięzeniowego, czy też dotyczą elementu obciążonego technologicznymi naprężeniami wstępnymi?

Str. 49, w. 4 od dołu

Czy chodzi o badania przedstawione w [70], które są kontynuacją badań materiałowych przedstawionych w pracy [68], czy odwrotnie?

Str. 52, w. 4 pod tab. 2.6

Zdanie „... prostowanie wywołuje odkształcenia na zimno naprzemiennie w przekroju elementu” jest niejasne. Chyba chodzi o prostowanie na zimno, a nie odkształcenia na zimno. O jaki pojedynczy przekrój z naprzemiennymi odkształceniami chodzi? Czy odkształcenia w pozostałych przekrojach nie są naprzemiennie?

Str. 52, tab. 2.7

Chodzi o modele rozkładu naprężeń wstępnych po gięciu dwuteownika walcowanego w płaszczyźnie mniej bezwładności.

Str. 53, w. 9-11 od góry, także wcześniej i dalej

Zdanie „... procedury dla gięcia względem silnej i słabej osi przekroju ...”. Procedury odnoszą się do gięcia, a nie są dla gięcia (anglicyzm). Słaba i silna oś przekroju to żargon (bezpośrednie tłumaczenie pojęć technicznych stosowanych w j. angielskim). Chodzi o zginanie w płaszczyznach większej i mniejszej bezwładności przekroju.

Str. 54, w. 1 pod rys. 2.53

Zdanie „Podsumowaniem całej serii artykułów było sformułowanie potrzeb badawczych ...” nie jest poprawne. Sformułowanie potrzeb badawczych nie może być podsumowaniem artykułów. Na podstawie badań i wniosków podanych w artykułach można sformułować kierunki dalszych badań.

Str. 55, w. 2 i w.9 pod opisem do rys. 2.54

Powołanie na rys. 2.54, a nie 2.53. Wymagane powołanie na pozycje Lange i in., np. [43] i [44].

Str. 56, rys. 2.55

Tablica a nie rysunek.

Str. 56, rys. 2.56

W opisie krzywych na rysunku – brak rozróżnienia koloru krzywych odnoszących się do „braku naprężeń własnych” i „z naprężeniami własnymi”?

Str. 57, w. 1 od góry

Fragment zdania „Podsumowując pracę [32] autorzy podkreślili, że ...” należałoby przeredagować „Autorzy pracy [32] podkreślili w podsumowaniu, że ...”.

Str. 59, rys. 2.58, str. 60, rys. 2.59

Tablice a nie rysunki.

Str. 59-60, opis dotyczący granicznej wartości promienia gięcia

W tekście niepotrzebnie powtórzono wzory (2.25) i (2.26), a do tego z innym oznaczeniem promienia gięcia (r zamiast R). Na rys. 2.57 oznaczenie „ f ” nie dotyczy wyniosłości łuku. Brak oznaczenia „ t ”. Nad rys. 2.58 tekst jest niezrozumiały: „... poniższa procedura stanowi wstępne określenie dopuszczalnego promienia gięcia”. Procedura nie może być określeniem?

Str. 66, tab. 4.2

W tab. 4.2 oraz w tekście w wielu miejscach słowo kształtownik zastępuje się terminem profil katalogowy lub po prostu profil. W budowlanych konstrukcjach stalowych używa się wyłącznie określenia kształtownik (dwuteownik, ceownik, kątownik). Profil jest pojęciem mylącym, gdyż dotyczy kształtu wyrobu. Określenie profil wywodzi się z j. niemieckiego. Poza tym w ostatnim wierszu, w trzeciej kolumnie powinno być 11900, a nie 12060.

Str. 80, rys. 4.12 a)

Rysunek sugeruje wyboczenie próbki w formie przesuwnej, bez obrotu na końcach (długość krytyczna h)? Czy punkt graniczny związany z wyboczeniem próbki był równoznaczny z końcem próby ściskania?

Str. 84, w. 1 od dołu

Chodzi o tab. 4.7, a nie 4.17?

Str. 91, rys. 4.22

Na pierwszym rysunku od lewej brak wyników oznaczonych granatowymi kółkami. Na pozostałych dwóch rysunkach, na wysokości średnika, występują punkty tylko w jednym kolorze. Nie wyjaśniono, w sposób jednoznaczny, jakich sytuacji dotyczy stosowana kolorystyka.

Str. 92, w. 8-10 od dołu

Wniosek o zróżnicowaniu wartości modułu sprężystości podłużnej nie został dostatecznie udokumentowany wynikami badań, które mogłyby być zilustrowane rysunkami. Czy kierunek walcowania, a następnie płaszczyzna gięcia na zimno mają istotny wpływ na wartość modułu sprężystości podłużnej? Samo stwierdzenie, bez omówienia zakresu różnic i zmian wartości modułu sprężystości podłużnej w wyniku gięcia na zimno jest niewystarczające w opracowaniu o charakterze naukowym.

Str. 95, rys. 4.27

Nie wyjaśniono, w sposób jednoznaczny, stosowanej kolorystyki (por. uwagi do rys. 4.22).

Str. 97-100, rys. 4.27

Wprowadzanie nowych oznaczeń $f_{y,s}$ i $f_{u,s}$ na oznaczenie nominalnej wartości granicy plastyczności i wytrzymałości stali na rozciąganie kształtownika „prostoliniowego” nie ma uzasadnienia. Granicę plastyczności stali wyrobu walcowanego oznacza się przez f_y .

Str. 119, tekst u dołu strony

Czy w modelu numerycznym technologicznego procesu rolkowego gięcia na zimno kształtownika HEB320 uwzględniono naprężenia własne walcownicze, czy też pominięto je? Jaki rozkład samorównoważonych w przekroju naprężeń własnych przyjęto do analizy? Czy rozkład naprężeń własnych aproksymował wyniki z badań własnych, czy też przyjęto jeden ze standardowych rozkładów ujętych z tab. 2.5?

Str. 126, rys. 6.1b

Brak powołania na rys. 6.1b, zarówno w tekście jak i w tab. 6.1. Zastanawia, dlaczego w badaniach dotyczących punktowego gięcia na zimno użyto innego kształtownika niż do badań procesu gięcia rolkowego (UC zamiast HEB)?

Str. 134-136, rys. 6.12- 6.16

Rysunki 6.12 i 6.13 przedstawiają ten sam element, ale w innym ujęciu, a więc umieszczenie 2 podobnych rysunków nie wnosi niczego nowego. Poza tym, recenzent uważa, że numery rysunków powinny być zmienione, a w ślad za tym powinny być zmienione powołania na kolejne rysunki: rys. 6.15 powinien być rys. 6.12, rys. 6.16 – rys. 6.13, rysunki 6.14 – 6.16 powinny być rysunkami 6.12 – 6.14.

Str. 138, w. 3 nad rys. 6.21

Siła jest zadawana, a nie nadawana.

Str. 153, w. 8 od góry

Zdanie „włókna światłowodu uległy lokalnemu wybaczaniu ...”. Włókna mogą ulec lokalnemu wyboczeniu, a nie mają zdolności wybaczania!

Str. 173, tab. 6.18

Górny rysunek w prawej kolumnie ma niewłaściwy opis – chodzi o 200 mm od góry.

Str. 194, w. 19-20 od dołu

Zdanie „... w przekroju występuje zmienny moduł Younga ..” jest mylące. Chodzi o właściwości stali w zależności od położenia punktu w przekroju (chodzi o anizotropię materiału w obrębie przekroju i w ogólności również na długości elementu).

Str. 202, poz. [32]

Fragment „*stresses inducted my*” należy zastąpić przez „*stresses inducted by*”. Pozycje bibliograficzne wymagają weryfikacji.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Krzysztofa MARCINCZAKA pt. ***Zmiana właściwości wytrzymałościowych stali i układu naprężeń własnych po formowaniu na zimno dwuteowych kształtowników walcowanych ze stali S460M***, która powstała w Politechnice Wrocławskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha LORENCA jako promotora oraz dr inż. Sławomira ROWIŃSKIGO jako promotora pomocniczego, stwierdzam, że Autor przedstawił w rozprawie oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując się:

- a) Ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu stosowania różnych metod doświadczalnych w zakresie śledzenia ewolucji cech mechanicznych stali w procesie gięcia na zimno, a także umiejętnością zastosowania różnych technik pomiarowych do monitorowania odkształceń w procesie formowania oraz szacowania odkształceń trwałych pozostających po technologicznych procesach walcowania oraz gięcia na zimno.
- b) Wiedzą praktyczną z zakresu zaawansowanych metod komputerowej symulacji procesów technologicznych rolkowego i punktowego gięcia na zimno dwuteowych kształtowników stalowych walcowanych na gorąco.
- c) Wiedzą w zakresie naukowego wnioskowania, na podstawie badań doświadczalnych i analiz numerycznych, o stopniu degradacji właściwości mechanicznych stali wskutek formowania na zimno, ewolucji walcowniczych naprężeń własnych oraz znajomości potehnologicznych odkształceń trwałych, w celu dobrania optymalnej technologii gięcia na zimno.

Przedstawiony w rozprawie problem naukowy mieści się w nurcie aktualnej tematyki w odniesieniu do konstrukcji stalowych, w szczególności konstrukcji mostowych, ma walory innowacyjnych analiz i badań o charakterze teoretycznym i aplikacyjnym. Autor rozpoznał aktualny stan wiedzy w tematyce objętej rozprawą, sformułował szczegółowe problemy badawcze oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań w zakresie odpowiednim do nakreślonego celu naukowego rozprawy, a także w zakresie zastosowanej metodologii badań i sposobu wnioskowania. Zauważone usterki rozprawy nie mają istotnego znaczenia jeżeli chodzi o wartość merytoryczną rozprawy.

Przedstawiona wyżej pozytywna ocena rozprawy oznacza, że praca spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

