

## Autoreferat

### Spis treści

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Imię i Nazwisko .....                                                                                                                                                        | 3  |
| 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej .....                                      | 3  |
| 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .....                                                                                                       | 4  |
| 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt.2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)..... | 4  |
| 4.1 Osiągnięcie pierwsze .....                                                                                                                                                  | 5  |
| 4.1.1 Tytuł, postać i istota osiągnięcia .....                                                                                                                                  | 5  |
| 4.1.2 Omówienie i organizacja osiągnięcia .....                                                                                                                                 | 5  |
| 4.1.3 Syntetyczne podsumowanie istoty osiągnięcia .....                                                                                                                         | 14 |
| 4.2 Osiągnięcie drugie .....                                                                                                                                                    | 15 |
| 4.2.1 Tytuł, postać i istota osiągnięcia .....                                                                                                                                  | 15 |
| 4.2.2 Omówienie i organizacja osiągnięcia .....                                                                                                                                 | 15 |
| 4.2.3 Syntetyczne podsumowanie istoty osiągnięcia .....                                                                                                                         | 27 |
| 5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej .....                 | 29 |
| 5.1 Współpraca z Michigan State University, East Lansing, USA .....                                                                                                             | 29 |
| 5.2 Współpraca z University of Ulster, Fire Research Laboratories FireSERT, Jordanstown Campus, Newtownabbey, UK .....                                                          | 29 |
| 5.3 Współpraca z Auburn University, Auburn, Alabama, USA .....                                                                                                                  | 30 |
| 5.4 Współpraca z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie .....                                                                                                                 | 30 |
| 5.5 Współpraca ze Szkołą Główną Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.....                                                                                                        | 30 |
| 5.6 Współpraca ze Szkołą Główną Służby Pożarniczej – Akademią Pożarniczą w Warszawie .....                                                                                      | 30 |
| 5.7 Współpraca z innymi jednostkami organizacyjnymi w Politechnice Warszawskiej .....                                                                                           | 31 |
| 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę .....                                                                                  | 32 |
| 6.1 Działalność dydaktyczna .....                                                                                                                                               | 32 |
| 6.2 Działalność organizacyjna i na rzecz środowiska inżynierskiego .....                                                                                                        | 33 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3 Działalność zawodowa i kontakty z otoczeniem gospodarczo-społecznym .....                                              | 34 |
| 6.4 Opieka naukowa nad studentami studiów doktoranckich .....                                                              | 35 |
| 6.5 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora<br>pomocniczego .....                   | 35 |
| 6.6 Działalność w zakresie popularyzacji nauki i propagowania wiedzy.....                                                  | 35 |
| 6.7 Działalność naukowa po doktoracie nie związana w sposób bezpośredni z tematyką<br>osiągnięć zgłoszonych do oceny ..... | 35 |
| 7. Inne osiągnięcia, w tym wyróżnienia, nagrody i odznaczenia .....                                                        | 36 |

## 1. Imię i Nazwisko

Paweł Artur Król

## 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- **Doktor** nauk technicznych w zakresie budownictwa

Podmiot nadający stopień: Rada Wydziału Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska  
20 czerwca 2007 r.

Tytuł rozprawy doktorskiej:

*„Analiza nośności i odkształcalności zakładkowych połączeń klejowych, śrubowych i klejowo-śrubowych w konstrukcjach z blach cienkich”*

Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Żółtowski

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Marian Giżejowski, prof. dr hab. inż. Aleksander Kozłowski

Praca została nagrodzona w konkursie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego

- **Magister inżynier** w zakresie budownictwa

Podmiot nadający stopień i tytuł zawodowy: Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

22 czerwca 1994 r., dyplom nr 5408/134171

Tytuł pracy magisterskiej:

*„Nośność klejono-śrubowych połączeń konstrukcji metalowych”*

Promotor: dr inż. Lech Kleśta

- **Inne**

- 15 maja 2000 r.: Uprawnienia budowlane do projektowania i kierowania robotami budowlanymi bez ograniczeń w specjalności konstrukcyjno-budowlanej (w zakresie konstrukcji budowlanych, dróg i mostów) nr ewid.: Wa-73/00; Wojewoda Mazowiecki, decyzja Nr 105/U/00
- 25 stycznia 2008 r.: Studia podyplomowe (dwusemestralne), Edycja 1, „Zarządzanie w Budownictwie”; Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej oraz Polish-British Construction Partnership
- 7 sierpnia 2014 r.: Tytuł Rzeczoznawcy Budowlanego w specjalności konstrukcyjno-budowlanej do projektowania i kierowania robotami

budowlanymi bez ograniczeń; Krajowa Komisja Kwalifikacyjna Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa, decyzja Nr RZE/X/0049/14

### **3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

- 1 października 2007 - nadal: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, adiunkt (badawczo-dydaktyczny), pełny etat
- 1 września 1998 – 30 września 2007: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Konstrukcji Budowlanych, asystent (naukowo-dydaktyczny), pełny etat

### **4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt.2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)**

Podstawą do ubiegania się przeze mnie o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport są dwa niezależne osiągnięcia naukowe, udokumentowane w postaci dwóch odrębnych monografii naukowych:

- **Osiągnięcie 1:**

Tytuł: **Sztywność i nośność zakładkowych połączeń hybrydowych elementów z blach cienkich**

**Forma:** monografia naukowa, zgodnie z art. 219 ust 1 pkt.2a Ustawy

Król P.A.: *Sztywność i nośność zakładkowych połączeń hybrydowych elementów z blach cienkich*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2025, s. 232, ISBN: 978-83-8156-782-4 (druk), ISBN: 978-83-8156-783-1 (online)

- **Osiągnięcie 2:**

Tytuł: **Wpływ oddziaływań pożaru na właściwości mechaniczne śrub konstrukcyjnych o podwyższonej wytrzymałości**

**Forma:** monografia naukowa, zgodnie z art. 219 ust 1 pkt.2a Ustawy

Król P.A.: *Wpływ oddziaływań pożaru na właściwości mechaniczne śrub konstrukcyjnych o podwyższonej wytrzymałości*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2025, s. 206, ISBN: 978-83-8156-802-9 (druk), ISBN: 978-83-8156-803-6 (online)

## 4.1 Osiągnięcie pierwsze

### 4.1.1 Tytuł, postać i istota osiągnięcia

Moim pierwszym osiągnięciem, stanowiącym istotny wkład w istniejący stan wiedzy, jest wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie możliwości poprawy kluczowych parametrów użytkowych – sztywności i nośności - połączeń na łączniki mechaniczne (śruby i wkręty), poprzez uprzednią aplikację spoiwa klejowego na powierzchnie styku łączonych elementów. Tym samym tematyka pracy dobrze wpisuje się w aktualne trendy badawcze w zakresie podatności połączeń i węzłów w konstrukcjach metalowych, uzupełniając dotychczasowy stan wiedzy w niniejszym obszarze, szczególnie w odniesieniu do połączeń niekonwencjonalnych. Celem pośrednim było wykazanie czy i w jakich okolicznościach zastosowanie łączników mechanicznych w połączeniach adhezyjnych (i odwrotnie) powoduje zwiększenie ich poziomu bezpieczeństwa i niezawodności, wykorzystując efekt synergii, oczekiwany z racji ich hybrydowego charakteru. Potwierdzenie lub negacja powyższych tez były zasadniczym celem podjętych prac badawczych, zaprezentowanych i podsumowanych w pierwszym osiągnięciu, udokumentowanym w postaci monografii pt. ***Sztywność i nośność zakładkowych połączeń hybrydowych elementów z blach cienkich,*** wydanej nakładem Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej. Praca w części bazuje na maszynopisie mojej rozprawy doktorskiej, stanowiąc jej uaktualnienie i rozwinięcie.

### 4.1.2. Omówienie i organizacja osiągnięcia

Połączenia są elementem każdej konstrukcji stalowej, zapewniając jej integralność i stateczność. Decydują o stopniu jej złożoności, wywierają wpływ na ostateczną postać schematu statycznego wykorzystywanego w analizach, przez co pośrednio wpływają na koszt wytworzenia konstrukcji i stopień zużycia materiałów. Dążenie do uproszczenia technologicznego połączeń w konstrukcjach metalowych zapoczątkowało prace studialne i badawcze nad różnymi wariantami węzłów półsztywnych, zwanych inaczej podatnymi. Problem ograniczonej sztywności węzłów ma szczególne znaczenie w przypadku konstrukcji projektowanych z elementów z blach cienkich, charakteryzujących się znaczną podatnością. Efekty prac nad podatnością połączeń wykonywanych w konstrukcjach z elementów walcowanych, grubościennych, znalazły odzwierciedlenie w przepisach normalizacyjnych i doprowadziły do stworzenia tzw. „składnikowej” metody analizy sztywności i nośności węzłów, opierającej się na sztywności poszczególnych komponentów wchodzących w ich skład, w zależności od konfiguracji. Połączenia w konstrukcjach cienkościennych stanowią nadal obszar nie do końca rozpoznany, choć wpływ podatności węzłów na nośność konstrukcji może się tu wydawać zdecydowanie istotniejszy. W pracy podjęto próbę analizy sztywności i nośności wybranych typów połączeń zakładkowych, możliwych do wykonania w konstrukcjach z blach cienkich. Oprócz tradycyjnych łączników mechanicznych w postaci śrub metrycznych i wkrętów samowiercących, uwzględniono także kleje do metali, niestosowane dotychczas szerzej do łączenia elementów konstrukcji budowlanych. We współczesnych konstrukcjach metalowych złącza hybrydowe znajdują zastosowanie głównie w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, ale także w budownictwie przemysłowym.

O ile w pojazdach i statkach powietrznych klej stosowany w połączeniach hybrydowych pełni głównie funkcję pomocniczą w złączach mniej odpowiedzialnych, zabezpieczając elementy poszycia przed niekorzystnymi drganiami i eliminując przenoszenie dźwięków, o tyle w przypadku prefabrykowanych zbiorników na ciecze – elastyczne spoiwa klejowe aplikowane na powierzchnie łączonych blach są traktowane przede wszystkim jako element uszczelniający. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest niewystarczający stan wiedzy nt. mechaniki połączeń hybrydowych oraz brak stosownych przepisów projektowych, dopuszczających powszechne stosowanie tego typu połączeń. Do chwili obecnej żaden obowiązujący dokument normalizacyjny nie przewiduje możliwości wykonywania klejowych połączeń konstrukcyjnych. Jako wady wskazuje się m.in. wysokie wymagania wykonawcze w zakresie przygotowania powierzchni, często nieprzewidywalne, gwałtowne formy zniszczenia, relatywnie niską odporność na podwyższone temperatury oraz małą powtarzalność/duży rozrzut właściwości wytrzymałościowych, nawet w przypadku złączy wykonywanych z uwzględnieniem rygorystycznych reżimów technologicznych. Jedyną normą projektowania konstrukcyjnego PN-EN 1999-1-1, która w swojej treści podnosi problematykę łączenia elementów poprzez klejenie, nie rekomenduje stosowania tej techniki do łączenia elementów głównych. W przypadku pozostałych rodzajów połączeń stwierdza się, że właściwości wytrzymałościowe złącza wymagają potwierdzenia w realnych warunkach eksploatacji, najlepiej w badaniach prototypów w skali naturalnej lub poligonowej. W przypadku połączeń hybrydowych wykonywanych z wykorzystaniem kleju, ta sama norma PN-EN 1999-1-1 nakłada na projektanta obowiązek wykazania, że między różnorodnymi typami łączników zachodzi efektywna współpraca. Stopień współpracy (udział w nośności) poszczególnych rodzajów łączników należy określać na podstawie analizy porównawczej zależności obciążenie–odkształcenie odpowiednich połączeń jednorodnych, składających się na połączenie hybrydowe, albo na podstawie badań kompletnych połączeń hybrydowych. Wskazane wyżej argumenty oraz naturalna ciekawość stanowiły przyczynę do podjęcia tej tematyki badawczej w ramach prowadzonej działalności naukowej.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów i obejmuje 232 strony, na które składają się 204 strony numerowane tekstu podstawowego, 16 stron wykazu bibliograficznego zawierającego 271 pozycji, 2 strony wykazu tabel (32 tabele), 4 strony wykazu rysunków (95 rysunków), 3 strony załącznika, zawierającego procedurę materiałową UMAT uwzględniającą lepkosprężysty model kleju oraz po jednej stronie streszczenia w językach polskim i angielskim. Tekst podstawowy zawiera: strony tytułowe oraz informacje wydawnicze (4 strony), spis treści (4 strony), wykaz ważniejszych oznaczeń (4 strony), oraz 7 rozdziałów tematycznych (188 stron).

W krótkim wprowadzeniu, stanowiącym przedmiot rozdziału pierwszego (4 strony), zawartym na stronach 13-16, przedstawiono rys historyczny i przesłanki motywujące do podjęcia tematyki badawczej z zakresu połączeń klejowych, śrubowych, wkrętowych i hybrydowych w konstrukcjach z blach cienkich. Zarysowano współczesne aplikacyjne możliwości zastosowania klejów konstrukcyjnych w budownictwie i przykłady tych zastosowań.

W rozdziale drugim, o objętości 48 stron (strony 17-64), zaprezentowano aktualny stan wiedzy w zakresie połączeń klejowych oraz połączeń z wykorzystaniem łączników mechanicznych elementów z blach cienkich. Opis stanu wiedzy zawiera wiele pozycji zagranicznych, poczynając od fundamentalnego dzieła Volkersena. Szczegółowo wskazano na bogaty dorobek krajowy badaczy z różnych ośrodków naukowych, ze szczególnie wyróżniającymi się w tym zakresie badaczami związanymi z Wojskową Akademią Techniczną oraz Politechnikami Warszawską, Krakowską i Lubelską. Przytoczono normowe postanowienia i zasady projektowania, połączeń blach cienkich na śruby i wkręty, zgodne z ideą Eurokodów. Zwrócono uwagę na dopuszczoną w normalizacji metodę projektowania połączeń na łączniki mechaniczne, wspomaganą badaniami, szczególnie przydatną w przypadku konstrukcji z blach cienkich, przybliżono dostępne w tym obszarze wytyczne ECCS, wymienione w treści normy PN-EN 1993-1-3 jako obowiązujące dokumenty tymczasowe, normujące zasady oceny nośności i sztywności połączeń na łączniki mechaniczne na podstawie wyników eksperymentu. Opisano szczegółowo aktualne rekomendacje dotyczące stosowania połączeń adhezyjnych i hybrydowych, omówiono zasady kształtowania, modele zniszczenia i mechanikę połączeń klejowych. W podsumowaniu tego rozdziału przedstawiono wnioski wynikające ze studiów literaturowych, wskazując na obszary koniecznych prac badawczych. Wynika z nich m.in., że w literaturze przedmiotu brak jest kompleksowych opracowań dotyczących zagadnień podatności węzłów w konstrukcjach z blach cienkich czy metod projektowania uwzględniających rzeczywisty charakter krzywych  $F-\delta$  lub  $M-\phi$  w tego typu ustrojach, do czego formalnie obligują projektantów dokumenty normalizacyjne. Stało się to źródłem inspiracji i jednym z przyczynków motywujących do zainteresowania się niniejszą tematyką badawczą i podjęcia prac nad zagadnieniem.

W rozdziale trzecim (4 strony), zawartym na stronach 65-68, przedstawiono cel i zakres monografii, przy czym główny nacisk położono na badania eksperymentalne, stąd wnioski zawarte w pracy są w większości wynikiem obserwacji rzeczywistych procesów i zjawisk fizycznych zachodzących w węzłach będących przedmiotem analizy. Poza częścią eksperymentalną, w monografii uwzględniono pewne elementy obliczeń numerycznych z wykorzystaniem MES, dedykowane analizom wyężenia wybranych typów połączeń, w których w zakresie obciążeń wywołujących degradację własności sprężystych sklein, wykorzystano gotowy element skończony typu *cohesive*, z biblioteki programu ABAQUS. Ten zakres analiz, jak przyjęto we wstępnych założeniach, miał jedynie pełnić funkcję narzędzia pomocniczego, uzupełniającego zrealizowane eksperymenty. Ponadto analizowano wpływ obciążenia długotrwałego na zachowanie się połączeń. W tym celu sformułowano lepkosprężyste relacje konstytutywne kleju, wykorzystujące standardowy model reologiczny, które następnie wykorzystano w badaniach numerycznych pełzania. Implementacja numeryczna wymagała zaprogramowania związków fizycznych i dołączenia ich do systemu ABAQUS za pośrednictwem procedury materiałowej UMAT. Do kalibracji procedury UMAT wykorzystano doświadczalną krzywą pełzania z badań własnych. Mając na względzie potencjalnie aplikacyjny charakter uzyskanych wyników, w badaniach wykorzystano dwa rodzaje klejów: utwardzane na zimno – możliwe do zastosowania w warunkach placu budowy lub wytwórni, służące głównie do łączenia elementów gabarytowych, oraz

utwardzane na gorąco – do łączenia elementów drobnowymiarowych, mieszczących się w komorze pieca.

Obszerny rozdział czwarty pt. „Badania doświadczalne” o objętości 113 stron (str. 69-182), stanowi główną i najbardziej obszerną część osiągnięcia, świadcząc o zakresie wkładu własnego autora oraz o wiodącym doświadczalnym charakterze monografii. W jego skład wchodzi 7 podrozdziałów w których szczegółowo opisano program wykonanych przez autora badań, na które składają się kolejno: badania właściwości mechanicznych stopów aluminium i stali, badania mechanicznych właściwości sklejin, badania nośności doraźnej obciążonych mimośrodowo zakładkowych połączeń klejowych, hybrydowych klejowo-śrubowych i śrubowych blach cienkich, badania zakładkowych klejowych, wkrętowych i hybrydowych wkrętowo-klejowych ścinanych połączeń elementów z profili cienkościennych, obciążonych w płaszczyźnie styku – w tym połączeń obciążonych siłą rozciągającą oraz połączeń obciążonych momentem zginającym. Należy tutaj nadmienić, że przyrządy zapewniające stały docisk próbek podczas klejenia, wykorzystane w badaniach mechanicznych właściwości sklejin były wykonane wg własnego pomysłu. Warto również dodać, że badania właściwości mechanicznych stopów aluminium i stali wykonano w ramach współpracy międzywydziałowej, w Laboratorium Wytrzymałościowym Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Pakiet badań eksperymentalnych wieńczą badania reologiczne pełzania sklejin rozciąganych i ścinanych. W trakcie badań pełzania wykorzystano, celem porównania, dwie niezależne techniki pomiarowe: tensometry oporowe oraz optoelektroniczne czujniki pomiaru drogi. Poczynione obserwacje wykazały niewielką przydatność tensometrii oporowej do pomiarów pełzania sklejin, w szczególności sklejin rozciąganych. Równocześnie wykazano, iż pomimo prowadzenia badań w pomieszczeniu o stabilizowanej temperaturze, przy jednoczesnym zastosowaniu urządzeń pomiarowych odpornych na zewnętrzne czynniki środowiskowe, skleiny okazały się bardzo wrażliwe na niewielkie nawet zmiany temperatury otoczenia. Wyniki uzyskane z badań pełzania dostarczyły wielu cennych informacji niezbędnych do budowy modelu numerycznego skleiny, jako ciała o właściwościach lepkosprężystych. Na ich podstawie opracowano parametry modelu numerycznego kleju, zaimplementowane następnie do programu ABAQUS w formie procedury materiałowej użytkownika, napisanej przez autora pracy na potrzeby prowadzonych badań i zamieszczonej na końcu monografii, w formie załącznika.

Badania nośności doraźnej obciążonych mimośrodowo zakładkowych połączeń klejowych, hybrydowych klejowo-śrubowych i śrubowych blach cienkich potwierdziły prawdziwość następujących pośrednich hipotez badawczych:

- Zniszczenie połączenia klejowego rozpoczyna się od rozwarstwienia skleiny w miejscach największej koncentracji naprężeń, tj. na końcach zakładki, co potwierdzono także na drodze symulacji numerycznych,
- Nośność połączenia klejowego po zastosowaniu przykrawędziowego wzmocnienia śrubami wyraźnie wzrasta, co świadczy o włączeniu śrub do współpracy przy przenoszeniu naprężeń normalnych w skleinie,



- Relacja pomiędzy nośnością połączeń hybrydowych klejowo-śrubowych w stosunku do analogicznych połączeń klejowych (zysk wynikający z wzmocnienia połączenia klejowego śrubami) wzrastała wraz ze wzrostem sztywności giętnej, natomiast w przypadku połączeń o niewielkiej sztywności, nośność połączeń śrubowych okazywała się większa od nośności, odpowiadających im pod względem wymiarowym, połączeń hybrydowych,
- Efektywność współpracy kleju i śrub, jest większa w przypadku klejów elastycznych, których sposób zniszczenia nie jest tak gwałtowny i ma charakter bardziej ciągliwy niż kruchy.

Badania nośności zakładkowych klejowych, wkrętowych i hybrydowych klejowo-wkrętowych ścinanych połączeń elementów z profili cienkościennych, obciążonych w płaszczyźnie styku, wykazały lub potwierdziły, iż m.in.

- Połączenia hybrydowe, w odróżnieniu od połączeń wykonanych jedynie przy wykorzystaniu samych wkrętów, niszczą się w sposób bardziej gwałtowny i mniej przewidywalny, zaś moment zniszczenia skleiny determinował proces zniszczenia całego połączenia,
- Wcześniejsza aplikacja kleju na powierzchnie stykowe elementów w zakładkowych połączeniach na wkręty, obciążone w płaszczyźnie styku, nie powoduje znaczącego zwiększenia nominalnej nośności tychże połączeń,
- Zauważalny wpływ na nośność połączenia na wkręty, poza całkowitą liczbą wkrętów zastosowanych w złączu, miał sposób ich rozmieszczenia na powierzchni styku. Bardziej równomierne rozstawienie wkrętów, przy tej samej ich liczbie, skutkowało zwiększeniem pomierzonej nośności połączenia i zmniejszeniem tempa degradacji sztywności,
- Obecność wkrętów w połączeniach, w sposób istotny zmniejszała rozrzut pomierzonych wartości obciążeń niszczących względem wartości średniej, w stosunku do analogicznych połączeń wykonanych jedynie przy użyciu kleju. Odnotowany rozrzut wyników, mierzony wielkością odchylenia standardowego, był zdecydowanie mniejszy w przypadku klejów niszczących się w sposób bardziej ciągliwy,
- Obecność kleju w połączeniach zwiększała nie tylko sztywność samego połączenia, ale także (w obrębie styku) sztywność łączonych elementów, eliminując niekorzystne odkształcenia ścianek łączonych elementów,
- Zaproponowane w postaci funkcyjnej krzywe regresji -  $F(\delta)$  i  $M(\phi)$  umożliwiają określenie szacunkowej sztywności chwilowej połączenia – odpowiednio  $F'(\delta)=dF/d\delta$  i  $M'(\phi)=dM/d\phi$  w dowolnym momencie pracy styku pod obciążeniem, aż do nominalnego zniszczenia, utożsamianego z chwilą, kiedy wzajemne przemieszczenie ścianek łączonych elementów, pomierzone w pobliżu łącznika najbardziej oddalonego od środka ciężkości układu łączników, przekroczy 3 mm. Dzięki tak przyjętemu opisowi, w sposób

bezpośredni, możliwe jest uzależnienie sztywności zależnej od wzajemnego przemieszczenia lub kąta obrotu elementów także od aktualnej wartości obciążenia działającego na połączenie.

Przeprowadzone analizy odkształcalności zakładkowych klejowych, wkrętowych i hybrydowych klejowo-wkrętowych ścinanych połączeń elementów z profili cienkościennych, obciążonych w płaszczyźnie styku wykazały, że zarówno wielkość sztywności początkowej, jak i sposób i tempo jej degradacji są zależne od wielu czynników, trudnych do jednoznacznego zdefiniowania w sposób ilościowy. W zależności od konfiguracji połączenia, wpływ na postęp degradacji mają czynniki, wynikające zarówno ze szczegółowych uwarunkowań geometrycznych i materiałowych, tak łączonych elementów, jak i kleju zastosowanego w złączu. W przypadku połączeń wykonanych wyłącznie z wykorzystaniem łączników mechanicznych, czynnikami mającymi istotny wpływ na odkształcalność połączeń były, zarówno liczba jak i sposób rozmieszczenia wkrętów w obrębie złącza. W przypadku połączeń wykonywanych z użyciem klejów mniejszy wpływ miał sposób rozmieszczenia łączników mechanicznych, większy natomiast – całkowita ich liczba w złączu. Niebagatelne znaczenie miała sztywność zastosowanego kleju, opisana wartością modułu odkształcalności oraz biegunowego momentu bezwładności kładu skleiny na powierzchnię styku.

Każdy z podrozdziałów podsumowano na bieżąco formułowanymi wnioskami, wynikającymi z obserwacji testowanych połączeń. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych opracowano statystycznie i zweryfikowano przy wykorzystaniu testu Grubbs'a stosowanego do weryfikacji wyników odstających, co okazało się metodą szczególnie przydatną w przypadku połączeń wykonanych z użyciem kleju, charakteryzujących się relatywnie dużym rozrzutem. Metoda zaproponowana przez Grubbs'a i wykorzystana w niniejszej monografii polega na weryfikacji hipotezy pomocniczej, która zakłada, że wszystkie wyniki, włącznie z odstającymi, są realizacją pewnej zmiennej losowej  $N(\mu, \sigma)$ , wartości  $\mu$  i  $\sigma$  nie są znane, zaś z punktu widzenia obranej metody ich znajomość nie jest konieczna.

Kolejny rozdział (piąty), zawarty na stronach 183-194 „Wybrane uwagi dotyczące analiz numerycznych” dotyczy zagadnień lepkosprężystości skleiny, w tym obliczeń modelowych z wykorzystaniem pakietu Abaqus. Bazując na standardowym modelu reologicznym, na podstawie analizy eksperymentalnych krzywych pełzania, sformułowano lepkosprężyste relacje konstytutywne kleju w przestrzennym stanie naprężenia. Wybór takiego modelu mechanicznego wynikał z obserwacji kształtu doświadczalnych krzywych pełzania. W pracy zastosowano metodę polegającą na uogólnieniu jednowymiarowych związków fizycznych standardowego modelu reologicznego na przypadek złożonego stanu naprężeń i odkształceń. Otrzymane relacje konstytutywne, zarówno w formie różniczkowej, jak i przyrostowej, stanowią oryginalny wkład autora, pozwalający na zastosowanie zaproponowanego sposobu opisu zjawiska w analizach numerycznych. Przyjęcie różniczkowej formy opisu wynikało z jednej strony z łatwości implementacji związków w ramach procedury UMAT, z drugiej zaś, podyktowane było chęcią zastosowania jednolitego opisu, który można rozszerzyć na modele sprężysto-plastyczne. W tym sensie obydwie

modele – lepkosprężysty i sprężysto-plastyczny – można traktować jako tzw. materiały reologiczne, tj. takie, którym towarzyszy akumulowanie energii w formie potencjalnej (zjawisko sprężystości) oraz jej rozpraszanie (zjawiska lepkości i plastyczności). Wyniki analiz przeprowadzone z wykorzystaniem związków fizycznych zaprogramowanych w ramach procedury UMAT potwierdziły adekwatność zaproponowanego podejścia w zakresie umiarkowanie dużych deformacji.

W tym samym rozdziale, w sposób zwięzły opisano również analizy numeryczne wybranych modeli analizowanych typów połączeń przeprowadzone dla sprężysto-plastycznego modelu materiału blach, śrub i wkrętów. W przypadku modelowania połączeń wykonanych z użyciem kleju, do dyskretyzacji warstwy kleju wykorzystano gotowe elementy skończone typu *cohesive* dostępne w bibliotece programu Abaqus. Przeprowadzono dwa rodzaje analiz. W pierwszym z nich wykonano symulacje w zakresie dużych deformacji warstwy, w celu określenia natychmiastowych odkształceń w stanie posprężystym (bez uwzględniania pełzania). W przyjętym modelu założono, że zachowanie materiału skleiny przed pojawieniem się trwałych deformacji jest idealnie sprężyste i poprzedza ono fazę inicjacji zniszczenia. W pracy, do opisu zakresu sprężystego zachowania kleju, przyjęto kryterium kwadratowego warunku naprężeń nominalnych. Oddzielnym kryterium określono proces ewolucji zniszczenia warstwy, związany z dyssypacją energii. Spośród wielu modeli dostępnych w Abaqus-ie wybrano kryterium ewolucyjne na podstawie propozycji Benzeggagha-Kenene'a. Drugi rodzaj analiz obejmował klej, dla którego przyjęto lepkosprężysty model materiału, zgodnie z tym, o czym była mowa wcześniej. Relacje konstytutywne skleiny zaprogramowano wykorzystując opracowaną procedurę UMAT. Zasadniczym celem tej analizy było prześledzenie procesu pełzania połączeń w zakresie umiarkowanie dużych deformacji, nieprzekraczających kilkunastu procent i niepowodujących powstawania trwałych odkształceń. Analiza uzyskanych na drodze badań eksperymentalnych krzywych pełzania pozwoliła na oszacowanie wielkości odkształceń lepkich, które narastają w czasie i zbiegają do pewnej granicznej wartości, właściwej dla danego rodzaju kleju. Dodatkowo porównano wyniki pełzania połączenia klejowego z połączeniem hybrydowym klejono-śrubowym. Po przyłożeniu obciążenia powstają natychmiastowe odkształcenia sprężyste, wynoszące w przypadku połączenia klejowego, około 18%. Następnie pojawiają się odkształcenia pełzania, których maksymalna wartość ustala się po około 150 godzinach na poziomie około 22,7%. Stosunek wartości odkształceń maksymalnych do odkształceń natychmiastowych wynosi około 1,26. W przypadku analogicznych pod względem geometrycznym połączeń hybrydowych, klejowo-śrubowych, uzyskano mniejsze wartości odkształceń w analizowanym elemencie. Przeprowadzone symulacje połączeń obciążonych mimośrodowo w stosunku do płaszczyzny styku/płaszczyzny skleiny, potwierdziły współpracę śrub przy przenoszeniu naprężeń normalnych, występujących w skleinie. Miarodajnym efektem tej współpracy, potwierdzonym doświadczalnie, było zwiększenie nośności połączeń w stosunku do analogicznych połączeń klejowych.

Porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami analiz numerycznych jest przedmiotem rozdziału 6, mieszczącego się na stronach 195-197. Należy nadmienić, że

z założenia czynności związane z opracowaniem modeli numerycznych, które początkowo nie miały stanowić głównego celu podjętej aktywności badawczej, w rzeczywistości okazały się dość istotną (w sensie pracochłonności) częścią aparatu badawczego. Z uwagi na objętość monografii, w jej treści ograniczono się jedynie do ujawnienia tych fragmentów obliczeń, które mogły posłużyć jako uzupełnienie lub materiał porównawczy zrealizowanych badań doświadczalnych. Prezentacja kompletnych wyników, ze względu na ograniczenia objętościowe i finansowe była na tym etapie niewykonalna. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów wykorzystano do kalibracji modeli numerycznych. Z uwagi na złożoność zagadnienia nie prowadzono ani prób doboru najwłaściwszego kryterium inicjacji zniszczenia, ani kryterium ewolucyjnego, bazując wyłącznie na przykładach dostępnych w literaturze oraz zadowalającej zbieżności uzyskanych rezultatów, z wynikami badań doświadczalnych. W wyniku przeprowadzonych analiz porównawczych stwierdzono, iż elementy skończone typu *cohesive*, dostępne w bibliotece systemu ABAQUS, niezbyt dokładnie oddawały procesy zachodzące w realnych połączeniach. Rzeczywisty, obserwowany w badaniach sposób zachowania się kleju w badanych połączeniach, odpowiadał bardziej zachowaniu ciał kruchych, podczas gdy specyfika elementów *cohesive* zakłada raczej ciągły charakter modelowanego tworzywa. Różnice te uniemożliwiły choćby przeprowadzenie wiarygodnego porównania wyników pomiarów wydłużenia trzpieni śrub w połączeniach hybrydowych, klejowo-śrubowych, z wynikami analiz numerycznych. Dla odróżnienia, analogiczne porównanie wyników przeprowadzone dla połączeń śrubowych potwierdziły dużą zbieżność wyników uzyskanych na drodze badań doświadczalnych z wynikami analiz z wykorzystaniem MES. Przeprowadzone analizy wykazały, że obliczenia wytrzymałościowe czy numeryczne połączeń wykonanych z użyciem kleju w zakresie liniowo-sprężystym, obciążonych w sposób doraźny, są jedynie w ograniczonym stopniu przydatne w procesie prognozowania ich nośności, gdyż większość klejów konstrukcyjnych wykazuje wyraźne właściwości nieliniowe i reologiczne. W świetle przeprowadzonych analiz może to prowadzić do wniosku, że w przypadku połączeń realizowanych z użyciem klejów, obliczenia numeryczne winny być raczej zorientowane pod kątem jakościowej analizy stanu wyężenia oraz obserwacji procesów i zjawisk zachodzących w obciążonej skleinie, niż analizy stricte ilościowej, związanej z pozyskiwaniem precyzyjnych informacji czy wartości.

Uwagi i wnioski końcowe są przedmiotem rozdziału 7, zawartego na stronach 199-204. Zaprezentowane w pracy spostrzeżenia i wyniki przeprowadzonych analiz stanowią potwierdzenie tez sformułowanych na wstępie. Wprowadzenie tradycyjnych łączników mechanicznych do połączenia klejowego w każdym przypadku zmniejsza rozrzut wyników i normalizuje sposób zachowania się połączenia pod obciążeniem. W przypadku połączeń jednozakładowych, obciążonych mimośrodowo w stosunku do płaszczyzny styku (płaszczyzny skleiny), śruby zlokalizowane w pobliżu skraju zakładki biorą udział w przenoszeniu naprężeń normalnych do powierzchni skleiny, zwykle inicjujących fazę zniszczenia kleju, przez co przyczyniają się do efektywnego zwiększenia nośności tychże połączeń. Potwierdzenie wyników badań doświadczalnych w zakresie współpracy śrub przy przenoszeniu naprężeń rozciągających uzyskano także na drodze analiz numerycznych. W przypadku obciążeń obciążonych osiowo, wpływ obecności wkretów nie wpływa zauważalnie na nośność skleiny, zaś moment ścięcia kleju w każdym przypadku inicjuje fazę

zniszczenia połączenia. Stopień i sposób wyężenia skleiny jest praktycznie jednakowy zarówno w przypadku połączeń klejowych, jak i hybrydowych klejowo-śrubowych. Obecność łączników mechanicznych w połączeniu wykonanym z użyciem kleju wpływa także korzystnie na zmniejszenie odkształceń pełzania skleiny, w przypadku połączeń poddanych obciążeniom długotrwałym o stałej wartości.

Rozpatrując konfigurację odwrotną, polegającą na porównaniu zachowania się pod obciążeniem zakładkowych połączeń hybrydowych, w stosunku do analogicznych połączeń wykonanych przy użyciu wyłącznie łączników mechanicznych, przeprowadzone badania wykazały jedynie ograniczony wpływ kleju nałożonego na powierzchnie styku łączonych elementów, na polepszenie walorów użytkowych węzłów. W każdym z analizowanych przypadków wcześniejsza aplikacja kleju na powierzchnie kontaktowe wykazała istotne zwiększenie sztywności początkowej i zmniejszenie odkształcalności w stosunku do połączeń wykonanych jedynie z wykorzystaniem śrub lub wkrętów. Niestety, przekroczenie obciążeń powodujących zniszczenie skleiny prowadzi do gwałtownego przeniesienia całości obciążeń na łączniki mechaniczne znajdujące się w obrębie połączenia, co w efekcie może skutkować jego natychmiastowym zniszczeniem, przy nominalnie niższych wartościach sił przypadających na pojedynczy łącznik, niż w przypadku analogicznych geometrycznie połączeń wykonanych wyłącznie przy pomocy śrub lub wkrętów. Uzyskane wyniki, ważne z naukowego punktu widzenia, wykazały, iż zastosowanie klejów elastycznych, bardziej ciągliwych, a więc w sensie podatności zbliżonych sposobem reakcji na przykładane obciążenie do połączeń zwykłych na śruby lub wkręty, pozwala na bardziej efektywną współpracę spoiwa klejowego z łącznikami mechanicznymi w całym obszarze obciążenia, poprawia warunki redystrybucji naprężeń, co w efekcie skutkuje zauważalnym zwiększeniem nośności połączenia wykonanego jako hybrydowe. Zastosowanie klejów kruchych skutkuje niezależnymi fazami pracy połączeń, zdominowanych przez właściwości skleiny (w pierwszej fazie obciążenia) i łączników mechanicznych (w fazie bezpośrednio poprzedzającej zniszczenie połączenia, po ścięciu skleiny).

W podsumowaniu pracy, zaproponowano parametryczną formułę definiującą całkowitą sztywność połączenia w formie zależności iloczynowo-potęgowej, pozwalającej na dowolne – liniowe i nieliniowe uwzględnienie wpływu każdego z 10 parametrów zawartych we wzorze. Ustalenie i walidacja parametrów równania dla różnych typów połączeń może wyznaczać kierunek dalszych prac badawczych nad zagadnieniem.

Wykaz bibliograficzny, złożony z 271 pozycji zamieszczono na stronach 205-220, wykaz tabel (32 tabele) na stronach 221-222, wykaz rysunków (95 rysunków), odpowiednio na stronach 223-226, załącznik z procedurą materiałową UMAT, uwzględniającą lepko-sprężysty model kleju stanowi zawartość stron 227-229, po którym zamieszczono jednostronicowe streszczenia w języku polskim (str. 230) i angielskim (str. 231).

### 4.1.3 Syntetyczne podsumowanie istoty osiągnięcia

Istotę przedstawionego do oceny pierwszego osiągnięcia można zawrzeć w następujących podpunktach, definiujących najistotniejszy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport:

- a) wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie możliwości poprawy kluczowych parametrów użytkowych – sztywności i nośności - połączeń na łączniki mechaniczne (śruby i wkręty), poprzez uprzednią aplikację spoiwa klejowego na powierzchni styku łączonych elementów,
- b) wykazanie, iż zastosowanie łączników mechanicznych w połączeniach adhezyjnych może, przy zachowaniu określonych warunków powodować zwiększenie poziomu ich bezpieczeństwa i niezawodności, wykorzystując efekt synergii, oczekiwany z racji ich hybrydowego charakteru,
- c) sformułowanie propozycji funkcyjnych krzywych regresji  $F(\delta)$  i  $M(\phi)$  umożliwiających określenie szacunkowej sztywności chwilowej połączenia – odpowiednio  $F'(\delta)=dF/d\delta$  i  $M'(\phi)=dM/d\phi$  w dowolnym momencie pracy, aż do nominalnego zniszczenia,
- d) wyznaczenie krzywych degradacji sztywności translacyjnej i obrotowej złączy będących ilorzem sztywności początkowej i sztywności chwilowej złącza -  $S_{j,ini}/S_t$ , o danej konfiguracji
- e) sformułowanie lepkosprężystych relacji konstytutywnych kleju w przestrzennym stanie naprężenia, wykorzystujących standardowy model reologiczny, które następnie wykorzystano w badaniach numerycznych pełzania
- f) opracowanie procedury materiałowej użytkownika UMAT, wykorzystującej wspomniane wcześniej relacje konstytutywne kleju i jej implementacja w środowisku ABAQUS
- g) sformułowanie propozycji uniwersalnej, parametrycznej formuły definiującej całkowitą sztywność połączenia w formie zależności iloczynowo-potęgowej, pozwalającej na dowolne – liniowe i nieliniowe uwzględnienie wpływu każdego z 10 parametrów zawartych we wzorze.

Zostały one osiągnięte poprzez realizację celów pośrednich opisanych szerzej w punkcie 4.1.2.

## 4.2 Osiągnięcie drugie

### 4.2.1 Tytuł, postać i istota osiągnięcia

Moim drugim osiągnięciem, stanowiącym istotny wkład w istniejący stan wiedzy, jest wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie wpływu oddziaływań pożaru na właściwości mechaniczne śrub o podwyższonej wytrzymałości, wraz ze wskazaniem propozycji metod oceny stopnia ich degradacji. W prowadzonych badaniach uwzględniono zarówno wpływ wartości temperatury, czasu ekspozycji, jak i sposobu gaszenia na trwałe zmiany właściwości oraz zmiany w mikrostrukturze stali śrubowej, skutkujące jej degradacją. Tym samym tematyka pracy dobrze wpisuje się w aktualne trendy badawcze w zakresie inżynierii bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji stalowych oraz potrzeby rynkowe, zgłaszane przez ekspertów reprezentujących grupy zawodowe zarówno inżynierów budownictwa, jak i inżynierów pożarnictwa. Zagadnienia powyższe stały się zasadniczym celem podjętych prac badawczych, zaprezentowanych i podsumowanych w drugim osiągnięciu, udokumentowanym w postaci monografii pt. *Wpływ oddziaływań pożaru na właściwości mechaniczne śrub konstrukcyjnych o podwyższonej wytrzymałości*, wydanej nakładem Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej. Tym samym praca stanowi podsumowanie kolejnego etapu zainteresowań badawczych jej autora, wpisując się naturalnie w cykl prac dedykowanych zagadnieniom nośności połączeń w konstrukcjach stalowych.

### 4.2.2 Omówienie i organizacja osiągnięcia

Jako, że oddziaływania pożarowe znacząco wpływają na konstrukcje obiektów – ich nośność i stateczność – parametry o fundamentalnym znaczeniu z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji oraz bezpieczeństwa ich bezpośrednich użytkowników, zagadnienia te stały się przedmiotem regulacji europejskich. Określone w dokumentach Unii Europejskiej bezpieczeństwo pożarowe jest drugim (spośród siedmiu) pod względem istotności, wymagań podstawowych, tuż za nośnością i statecznością konstrukcji, co stanowi o jego randze i znaczeniu. Zapisane w przepisach krajowych wymagania szczegółowe, dot. dla przykładu możliwości opuszczenia budynku, odporności konstrukcji na działanie dymu i ognia czy bezpieczeństwa ekip ratowniczych nie są rozłączne, winny być zapewnione przez określony czas, odpowiadający kryteriom wynikającym z klasy odporności pożarowej obiektu, do której został on zakwalifikowany. Nie jest tajemnicą, że połączenia, stanowiące nieodłączny element każdej konstrukcji stalowej, odgrywają w spełnieniu tych wymagań rolę kluczową.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów i obejmuje 206 stron, na które składają się 194 strony numerowane tekstu podstawowego, 8 stron wykazu bibliograficznego zawierającego 131 pozycji oraz po dwie strony streszczeń w językach polskim i angielskim. Tekst podstawowy zawiera: strony tytułowe oraz informacje wydawnicze (4 strony), podziękowania (1 strona), spis treści (2 strony), wykaz ważniejszych oznaczeń (6 strony), oraz 7 rozdziałów tematycznych (180 stron).

W krótkim wprowadzeniu, stanowiącym przedmiot rozdziału pierwszego (12 stron), mieszczącym się na stronach 15-26, zawarto opis pożaru oraz jego wpływu na konstrukcje, statystyki katastrof i informacje na temat pożarów obiektów o konstrukcji stalowej, wraz z przykładami, jak również zaprezentowano rys historyczny oraz współczesne metody wytwarzania śrub, ze zwróceniem uwagi na czynniki, mające kluczowy wpływ na ich finalne właściwości mechaniczne. Szerzej omówiono przykłady obiektów, w przypadku których za bezpośrednią przyczynę ich częściowego lub całkowitego zawalenia się w wyniku pożaru uznano awarię śrubowych połączeń pomiędzy elementami konstrukcji – budynku The One New York Plaza w 1970 r. oraz The World Trade Center 5 w 2001 r.

W rozdziale drugim, o objętości 6 stron (str. 27-32), dotyczącym skutków ekspozycji pożarowej na zmiany w strukturze stali opisano zagadnienia wpływu procentowej zawartości węgla na właściwości stali, bezpośredniego oddziaływania ognia na wyeksponowaną powierzchnię stali oraz przemian strukturalnych zachodzących w stali podczas procesów jej nagrzewania i chłodzenia.

W rozdziale 3., o objętości 12 stron (str. 33-44), przybliżono zagadnienia związane z projektowaniem połączeń z uwzględnieniem oddziaływań pożaru. Omówiono wnioski wypływające z badań eksperymentalnych przeprowadzonych w skali naturalnej, do których można zaliczyć np. testy w Cardington (UK) i w Mokrsko (Czechy), oraz zalecenia wynikające bezpośrednio z treści dokumentów o charakterze normalizacyjnym: Model Code on Fire Engineering czy PN-EN 1993-1-2. Zaprezentowano metody określania temperatury węzłów w pożarze oraz sposoby określania nośności obliczeniowej śrub w sytuacji pożaru, odpowiednio w: - połączeniach zakładkowych typu dociskowego (kat. A), - połączeniach ciernych w stanie granicznym użyteczności (kat. B), - połączeniach ciernych w stanie granicznym nośności (kat. C), - połączeniach doczołowych niesprężanych (kat. D) i – doczołowych sprężanych (kat. E). Podano też zależności pozwalające określić wartości odpowiednich nośności obliczeniowych śrub w normalnej sytuacji projektowej, które stanowią element pośredni na drodze do ustalenia adekwatnych wielkości w sytuacji pożarowej.

W rozdziale 4., zawartym na 22 stronach (str. 45-66), dotyczącym w całości po-pożarowych właściwości mechanicznych śrub dokonano obszernego przeglądu literatury przedmiotu, prezentując zaczerpnięte ze źródeł bibliograficznych propozycje zależności opisujących stopień redukcji danej właściwości materiału po ekspozycji pożarowej w odniesieniu do tej samej właściwości, określonej na próbce referencyjnej w stanie wyjściowym, oraz sformułowano przedmiot, zasadnicze cele i zakres pracy. Zwrócono uwagę, iż zdecydowana większość możliwie kompleksowych badań, raportowanych w literaturze przedmiotu, odnosi się do tradycyjnych niestopowych lub niskostopowych stali konstrukcyjnych, które swoje właściwości zawdzięczają bądź obecności w ich składzie chemicznym pierwiastków stopowych, bądź też obróbce mechanicznej, przez formowanie na zimno lub gorąco. Znacząco mniejszy zakres prac badawczych dedykowano stali śrubowej, wykorzystywanej do produkcji śrub o podwyższonej wytrzymałości, których finalne właściwości wynikają nie tylko z obecności zastosowanych dodatków stopowych, ale przede wszystkim



z odpowiednio zaprojektowanych procesów obróbki cieplnej – hartowania i odpuszczania. To powoduje, iż stale śrubowe w warunkach odpowiadających oddziaływaniom symulowanego pożaru zachowują się odmiennie od typowych stali konstrukcyjnych, a sposób odpowiedzi na zadaną ekspozycję termiczną jest ściśle powiązany z przekroczeniem pewnych progowych wartości temperatury: temperatury odpuszczania zastosowanej w procesie produkcyjnym, temperatury początku i końca przemiany fazowej (odpowiednio  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$ ), oraz temperatury hartowania. Poza wskazanymi czynnikami, nie bez znaczenia pozostaje czas ekspozycji na zadane warunki termiczne oraz szybkość chłodzenia, wynikająca ze scenariusza pożaru czy też sposobu prowadzenia akcji gaśniczej. Przeprowadzony przegląd literaturowy wykazał, iż badania raportowane w opublikowanych pracach w większości nie podchodzą do analizy zagadnienia w sposób kompleksowy, ograniczając się jedynie do kwestii oceny stopnia degradacji typowych właściwości mechanicznych, na podstawie wyników możliwych do uzyskania np. w statycznej próbie rozciągania, albo koncentrując się wyłącznie na zagadnieniach z pogranicza inżynierii materiałów i metalurgii. Ponadto zastosowane w raportowanych badaniach czasy wygrzewania zostały dobrane w sposób arbitralny, nie znajdujący odzwierciedlenia w obowiązujących przepisach techniczno-budowlanych, co stwarza pewne ograniczenia w możliwości ich praktycznej aplikacji i wykorzystania na potrzeby eksperckiej oceny konstrukcji, zarówno obiektów budowlanych, jak i, wykonanych ze stali, maszyn i urządzeń, po epizodzie pożarowym. Mając na względzie wymienione niedostatki, celem autora monografii było zastosowanie podejścia holistycznego, polegającego na kompleksowej analizie wyników wielokryterialnych prac badawczych, popartych wynikami obliczeń wykonanych przy użyciu narzędzi numerycznych, gdyż tylko takie podejście do zagadnienia jest w stanie zagwarantować wiarygodną ocenę przydatności stali uszkodzonej w pożarze (w tym w szczególności ulepszonej cieplnie stali śrubowej), do dalszego wykorzystania. Celem, jaki postawił sobie autor monografii było uzyskanie wyników przydatnych z aplikacyjnego punktu widzenia i – przynajmniej w części – możliwych do uzyskania przy wykorzystaniu możliwie nieskomplikowanych metod badawczych. W wielu aspektach, przyjęte metody i procedury badawcze, jak i np. dobór geometrii próbek do badań udarności, można uznać za unikalne i oryginalne rozwiązania autorskie, nie znajdujące odpowiedników w dostępnej literaturze i jako takie, same w sobie mające wymiar oryginalnego osiągnięcia. Wykazano także, że dostępne w literaturze przedmiotu modele predykcyjne, umożliwiające prognozowanie wybranych właściwości mechanicznych na podstawie znajomości maksymalnej temperatury stali osiągniętej w pożarze, pozostają poprawne i precyzyjne niemal wyłącznie w odniesieniu do wyników badań, z wykorzystaniem których zostały opracowane, przez co nie mają one atrybutu uniwersalności. Udowodniono, iż w większości przypadków, krzywe te nie odpowiadają precyzyjnie nawet wynikom uzyskanym dla śrub wykonanych w tej samej klasie wytrzymałościowej, ale z innego materiału wsadowego lub przy odmiennych parametrach obróbki cieplnej, przez co ich przydatność, oceniana przez pryzmat praktycznej użyteczności, pozostaje co najmniej wątpliwa. Autor ma świadomość, że zakres proponowanych i zrealizowanych badań nie wyczerpuje pełnego pakietu działań możliwych do przeprowadzenia, został jednak dostosowany do występujących ograniczeń oraz możliwości – zarówno technicznych, jak i finansowych.

W rozdziale 5. o objętości 120 stron (str. 67-186), złożonym z 9 podrozdziałów, dotyczącym analiz wspomaganych komputerowo i badań eksperymentalnych, opisano kolejno: analizy nieniszczące, obejmujące analizę składu chemicznego i badania towarzyszące, analizy obliczeniowe z wykorzystaniem oprogramowania JMatPro, badania doraźnej nośności śrub na zrywanie i ścinanie, testy twardości, udarność, badania mikrostrukturalne z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej i elektronowej, po-pożarowych właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania próbek znormalizowanych 5-krotnych oraz przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania pomiarów bezpośrednich wybranych właściwości mechanicznych do pośredniego szacowania wytrzymałości śrub na rozciąganie. Należy nadmienić, że wszelkie prace analityczno-badawcze, udokumentowane w rozdziale 5. i podsumowane w rozdziałach 6. i 7. monografii stanowią istotę pracy, świadczącą o wyłącznym wkładzie własnym autora w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport i jako takie stanowią samodzielne osiągnięcie naukowe.

W prowadzonych badaniach doraźnej nośności śrub na zrywanie i ścinanie wykorzystano kompletne zestawy śrubowe, spełniające kryteria normy PN-EN 15048-1:2016-09, złożone ze śrub M20/200-8.8, towarzyszących im nakrętek klasy 8 i podkładek. Wszystkie śruby pochodziły z jednej partii produkcyjnej, co pozwoliło na przyjęcie założenia, iż w rozumieniu statystycznym stanowiły elementy powtarzalne. Zostały wykonane z walcówki gładkiej, ze stali chromowej z dodatkiem boru, o symbolu 32CrB3. Warto wspomnieć, że tak wyspecyfikowany gatunek nie jest przedmiotem żadnej z dostępnych na rynku norm ani elektronicznych baz materiałów, co w efekcie znacząco utrudniło zbieranie informacji na jego temat oraz część z prowadzonych analiz. Śruby wyprodukowano w procesie kucia na zimno, a następnie w celu uzyskania oczekiwanych właściwości mechanicznych odpowiadających klasie wytrzymałościowej 8.8, poddano ulepszaniu cieplnemu poprzez hartowanie w oleju, w temperaturze ok. 850-860°C i odpuszczanie w temperaturze ok. 550°C, nakrętki zaś – w procesie kucia i otworowania na gorąco. Celem ustalenia wpływu symulowanego pożaru na właściwości mechaniczne stali, nieobciążone śruby w stanie fabrycznym poddano oddziaływaniom termicznym, wygrzewając je partiami w piecu elektrycznym w zakresie temperatur od 100°C do 1000°C (odpowiednio 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 650, 700, 450, 800, 900 i 1000°C) w zależności od rodzaju badań, przez czas określony w przepisach techniczno-budowlanych (*Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*), odpowiadający klasom nośności ogniowej elementów głównej konstrukcji nośnej budynków, tj. 30', 60', 120' i 240'. Na tę chwilę nie są dostępne żadne inne wytyczne ani normy, które regulowałyby wymagania w tym obszarze i mogłyby stanowić dokument odniesienia w zakresie prowadzenia eksperymentów po-pożarowych, tak więc sam sposób prowadzenia badań można uznać za autorskie dzieło autora monografii. Próbkę umieszczano w komorze pieca uprzednio nagrzanego do poziomu żądanej temperatury, przetrzymując w tych warunkach przez odpowiednio 1-10 minut, przyjmując w ślad za doniesieniami z literatury, szacunkowe tempo nagrzewania próbek na poziomie ok. 100°C/min, a następnie uruchamiano pomiar czasu wygrzewania. Temperaturę komory pieca kontrolowano za pomocą 4 termopar, rozmieszczonych równomiernie w jej wnętrzu. Po tak zadanej ekspozycji termicznej część próbek, po wyjęciu z pieca, pozostawiano

w temperaturze otoczenia do swobodnego wystygnięcia, co miało odpowiadać sytuacji samorzutnego, naturalnego zakończenia pożaru, wynikającego bądź z niedostatku tlenu, bądź niedoboru substancji palnych. Drugą partię próbek chłodzono w sposób szokowy, poprzez zanurzenie w wodzie, gdzie przetrzymywano je aż do momentu całkowitego wystudzenia, co miało symulować warunki intensywnie prowadzonej akcji gaśniczej.

Z uwagi na niestandardowy gatunek stali, z jakiej wykonano śruby, celem uwiarygodnienia jakości analiz materiałowych związanych z modelowaniem przemian fazowych przy wykorzystaniu oprogramowania JMatPro, przeprowadzono potwierdzające badania składu chemicznego. Wykorzystano do tego dwie niezależne metody. Badanie za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) marki JOEL, model JSM-6610, wyposażonego w detektor elektronów wtórnych SE i detektor elektronów wstecznie rozproszonych, wzbogacone o powierzchniową mikroanalizę składu chemicznego przy użyciu spektrometru energo-dyspersyjnego typu Oxford X-Max, wykorzystującego metodę spektrometrii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS) wykonano w ramach współpracy w Laboratorium Instytutu Budowy Maszyn Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Niezależne badania, z użyciem spektrometru, wykorzystującego technikę fluorescencji rentgenowskiej XRF Olympus Delta DP-2000, przeprowadzono w Laboratorium Badań dla Przemysłu Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Porównanie i omówienie wyników zamieszczono w pracy.

Analizy obliczeniowe z wykorzystaniem oprogramowania JMatPro przeprowadzono w Pracowni Komputerowej Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. W pierwszej kolejności wykonano obliczenia pozwalające na określenie schematu ewolucji poszczególnych faz w stanie równowagi, w zależności od temperatury, oraz kinetyki przemian fazowych podczas austenitzacji (przy stałych szybkościach nagrzewania), z uwzględnieniem wyjściowej struktury materiału odpowiadającej wcześniejszemu hartowaniu i odpuszczaniu oraz przy przyjętej prędkości nagrzewania. Pozwoliło to na określenie wartości temperatur  $Ac_1$  i  $Ac_3$ . Dla wybranych wartości temperatury, wyższych od temperatury inicjacji przemiany -  $Ac_1$ , sporządzono krzywe  $CTP_c$  (ang. CCT) i  $CTP_i$  (ang. TTT), obrazujące odpowiednio: przemiany zachodzące w danym gatunku stali podczas chłodzenia ciągłego z temperatury austenitzowania z różnymi prędkościami - w przypadku krzywych  $CTP_c$ , oraz przemiany strukturalne zachodzące w danym gatunku stali w czasie chłodzenia izotermicznego (tj. przystankiem temperaturowym) z temperatury austenitzowania, z różnymi stopniami przechłodzenia - w przypadku krzywych  $CTP_i$ . Ich przebieg jest unikalny dla każdego gatunku stali, jako że jest on zależny od jej składu chemicznego. Na ich podstawie można wnioskować, jakie przemiany zachodzą w stali o danym składzie chemicznym podczas chłodzenia, w jakim zakresie temperatury będą przebiegać, po jakim czasie się rozpoczną i zakończą oraz jakie fazy i w jakich ilościach będą występowały w strukturze materiału po zakończeniu procesu. Spośród wielu uzyskanych krzywych na szczególną uwagę zasługują krzywe odpowiadające austenitzacji w temperaturach 750°C oraz 800°C, które znacząco odróżniają się od wykresów wygenerowanych dla pozostałych wartości temperatury. Wygrzewanie w temperaturze 750°C prowadzi do wejścia w zakres struktur ferrytyczno-austenitycznych, które

w zależności od tempa późniejszego chłodzenia mogą finalnie skutkować najróżniejszymi kombinacjami struktur ferrytyczno-perlitycznych o różnym udziale i dyspersji poszczególnych faz, a zatem charakteryzującymi się zupełnie odmiennymi właściwościami mechanicznymi. Temperatura jest jeszcze zbyt niska, by przemiana uległa zakończeniu, więc część ferrytu nie zdążyła przejść przemiany fazowej, co w konsekwencji spowoduje, iż studzenie z tej temperatury, niezależnie od zastosowanej prędkości będzie skutkować obecnością fazy ferrytycznej w strukturze materiału. W przypadku bardzo wolnego chłodzenia obecne będą także perlit i prawdopodobne są niewielkie ilości bainitu. Szybkie studzenie spowoduje niepełne zahartowanie materiału, pojawią się więc w jego strukturze także bainit i martenzyt, którym mogą towarzyszyć wtrącenia austenitu resztkowego. Z technologicznego punktu widzenia hartowanie z poziomu temperatury mieszczącej się pomiędzy  $Ac_1$  a  $Ac_3$  jest określone mianem hartowania niepełnego i jest uznawane za wadliwe. W praktyce będzie zawsze skutkować niepewną strukturą oraz przypadkowymi, trudnymi do przewidzenia właściwościami mechanicznymi materiału. Równie ciekawych spostrzeżeń dostarczają wykresy  $CTP_c$  odnoszące się do wygrzewania w temperaturze  $800^\circ C$ , które odróżniają się zakresem zasięgu krzywej symbolizującej początek przemiany perlitycznej, sięgającej znacznie głębiej w obszar ograniczony liniami odpowiadającymi prędkościom chłodzenia  $100^\circ C/s$  i  $10^\circ C/s$ . W żadnym z pozostałych przypadków trend ten nie ulega powtórzeniu. Ta swoista niespójność w zakresie przebiegu przemian fazowych w przypadku chłodzenia z temperatury  $800^\circ C$  ujawni się w dalszej części badań w formie trudnych do wyjaśnienia anomalii/obserwacji w zakresie sposobu zachowania się próbek pod obciążeniem, czy pozornej niespójności wyników badań właściwości mechanicznych prowadzonych na próbkach wygrzewanych w tej temperaturze. Rezultaty analiz obliczeniowych znajdą również potwierdzenie w obrazie mikrostruktury materiału i znacząco ułatwią ich interpretację.

Badania doraźnej nośności po-pożarowej zestawów śrubowych na zrywanie przeprowadzono na łącznej liczbie 267 próbek, których szczegółowy wykaz zamieszczono w monografii. Badania wykonano w Pracowni Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Centrum Wodnego SGGW. Zasadniczym celem tej grupy badań było ustalenie nośności na zrywanie zestawu śrubowego, traktowanego jako kompletny produkt, zaprojektowany do przenoszenia sił rozciągających występujących w obciążonym złączu, spełniający wymagania normy PN-EN 15048-1:2016-09. Zdaniem autora monografii, próba wykorzystania testów rozciągania, prowadzonych na pełnowymiarowych zestawach śrubowych, do ustalenia po-pożarowych właściwości mechanicznych materiału – tak, jak uczyniono to w niektórych przywołanych w pracy źródłach literaturowych – jest działaniem niewłaściwym, prowadzącym do uzyskania nieprecyzyjnych wyników. Przyczyn owych niedokładności można upatrywać chociażby w trudnych do wyeliminowania lub uwzględnienia podatnościach występujących na styku poszczególnych elementów zestawu śrubowego (np. podatności docisku podkładki do łba lub nakrętki, podatności zwojów gwintu w miejscach interakcji nakrętki z trzpieniem, itp.) ewentualnych wariantowych formach zniszczenia (zerwanie trzpienia na przypadkowym odcinku części gwintowanej lub poślizg/ścięcie gwintu). W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono przebieg krzywych naprężenie-przemieszczenie, średnie wartości siły rozciągającej/zrywającej, odchylenia

standardowego, współczynników zmienności, nośności obliczeniowej, obliczonej na podstawie procedur przyjętych w normie PN-EN 1990:2004, wartości nominalne nośności obliczeniowej na rozciąganie, wyliczone zgodnie z zasadami podanymi w PN-EN 1993-1-8:2006, wzajemną relację uzyskanych wartości oraz odnotowane formy zniszczenia. Przeanalizowano wpływ czasu zadanej ekspozycji termicznej oraz zastosowanej metody chłodzenia na przebieg krzywych naprężenie-przemieszczenie i sposób odpowiedzi śrub na przyłożone obciążenia. Ponadto wyznaczono wartości współczynników redukcyjnych rezydualnej nośności po-pożarowej na zrywanie, zwane dalej współczynnikami retencji oraz wartości tzw. współczynników odzysku. Wspomniany współczynnik retencji, przyjęty jako miara redukcji danej właściwości  $X$  materiału lub wyrobu po ekspozycji pożarowej, oznaczony symbolicznie jako  $R_{X,\theta,post}$ , który definiuje się jako iloraz wartości określonej właściwości po przejściu pełnego cyklu termicznego, obejmującego nagrzewanie do temperatury  $\theta$ , przetrzymanie w danej temperaturze przez zaplanowany okres czasu i następnie schłodzenie, zgodnie z przyjętą metodą oraz, odpowiadającej jej wartości tej samej właściwości określonej dla próbki referencyjnej, nie poddanej ekspozycji pożarowej, wyznaczonej w ten sam sposób. W przypadku śrub konstrukcyjnych, wartość współczynnika retencji można utożsamiać z iloczynem normowego współczynnika redukcyjnego nośności śrub –  $k_{b,\theta}$ , określonego, jak dla sytuacji pożaru, oraz odpowiadającego mu nowego współczynnika, zwanego dalej współczynnikiem odzysku –  $r_{t,\theta,post}$ . Przyjęta formuła, uzależniająca stopień redukcji właściwości od odseparowanego normowego współczynnika redukcyjnego nośności śrub –  $k_{b,\theta}$ , który przyjmuje identyczne wartości niezależnie od kierunku obciążenia trzpienia śruby, ma dzięki temu bardziej uniwersalny charakter i w podobnej postaci może zostać zastosowana także w przypadku próby ścinania. Współczynnik retencji przyjmuje wartości mniejsze od 1,0, jeśli dana właściwość lub parametr po ekspozycji pożarowej osiąga wartości mniejsze od referencyjnych, określonych na próbce w stanie dostawy i większe od 1,0, jeśli sytuacja jest odwrotna. Współczynnik odzysku wskazuje natomiast, w jakiej relacji pozostaje dana wielkość, oznaczona po ekspozycji termicznej, w stosunku do analogicznej wielkości w trakcie pożaru. Może on przyjmować wartości wyższe od 1,0 wówczas, gdy wartość danej właściwości lub parametru, pomierzona na próbce wystudzonej po pożarze, jest większa od tej samej właściwości określonej w sytuacji pożarowej. Dla odmiany – wartości współczynnika odzysku niższe od 1,0 oznaczają, że szybkość degradacji danej właściwości rezydualnej ocenionej po pożarze jest wyższa od szybkości degradacji tej samej właściwości w warunkach pożaru. W wymiarze praktycznym wiedza na ten temat może mieć istotne znaczenie, ponieważ wskazuje na niebezpieczeństwo, iż dana właściwość, w wyniku przebytego epizodu pożarowego ulegnie degradacji do wartości mniejszej niż jest przewidywana bezpośrednio w trakcie ekspozycji termicznej. Wartości współczynników odzysku oraz współczynników retencji zestawiono w formie tabelarycznej. Te ostatnie dodatkowo porównano na wykresach z krzywymi predykcyjnymi zaczerpniętymi z literatury oraz omówiono stwierdzone rozbieżności. Ze względu na zakres tych rozbieżności, zdaniem autora monografii, dobór krzywych predykcyjnych dopasowanych do konkretnego pakietu wyników wydaje się na tym etapie wiedzy, z punktu widzenia ich praktycznej przydatności, niespecjalnie uzasadniony i wręcz bezcelowy. Na zakończenie szczegółowo omówiono zarejestrowane formy zniszczenia oraz charakter złomów.

Badania doraźnej nośności po-pożarowej śrub na ścinanie przeprowadzono i udokumentowano wg analogicznej konwencji, jak w przypadku oceny nośności na zrywanie.

Przedmiotem podrozdziału 5.5 są badania twardości. Zrealizowano je sposobem Rockwella na niegwintowanych fragmentach trzpieni śrub, wykorzystanych uprzednio w statycznej próbie ścinania, co dawało gwarancję, iż odpowiadające sobie próbki zostały poddane identycznym procesom nagrzewania i chłodzenia. Wybór metody Rockwella był podyktowany jej uniwersalnością – możliwością wykorzystania w przypadku materiałów o zróżnicowanej twardości oraz wyrobów o zakrzywionej, walcowej powierzchni, jak również dużą szybkością pomiaru i łatwością bezpośredniego odczytu wyniku, bez konieczności jego przeliczania. Wyniki, celem ich ujednolicenia i dalszego wykorzystania do przybliżonego szacowania wytrzymałości stali na rozciąganie, przekonwertowano do twardości Brinella. Celem wizualizacji stopnia współzależności pomiędzy określonymi właściwościami mechanicznymi, wyniki zestawiono na wspólnych wykresach z wartościami nośności na zrywanie, pomierzonymi w statycznej próbie rozciągania śrub oraz wartościami oszacowanymi na podstawie pomiarów twardości. W przypadku próbek wygrzewanych powyżej temperatury odpuszczania w procesie produkcyjnym, zarówno wartości twardości, jak i wytrzymałości na rozciąganie, sukcesywnie spadają. Prawidłowość ta stanowi jeden z najbardziej wiarygodnych sposobów pozwalających na ustalenie termicznych parametrów procesu obróbki cieplnej i może stanowić niezależną metodę oceny temperatury odpuszczania w sytuacji, kiedy pozyskanie wiarygodnych informacji ze źródeł alternatywnych nie jest możliwe. Trend uzyskanych wyników potwierdza zakres ewolucji parametrów wynikających z przemian fazowych zachodzących w materiale, po przekroczeniu wartości temperatury  $A_{c1}$ . Ponadto poddano weryfikacji zależność korelacyjną występującą pomiędzy twardością HB a wytrzymałością na rozciąganie. Według dostępnych źródeł, wartość współczynnika przeliczeniowego mieści się w przedziale między 3,38 a 3,55. Wartości uzyskane w badaniach istotnie odbiegają od podanego przedziału określoności i wynoszą – w przypadku śrub stygnących naturalnie w powietrzu: od 3,07 do 4,63, natomiast w przypadku śrub studzonych w sposób przyspieszony w wodzie, odpowiednio: od 2,82 do 4,58, co wskazuje na fakt, iż ogólnie uznana zależność nie jest wystarczająco dopasowana do przypadku materiałów poddanych zróżnicowanym, niekontrolowanym procesom wtórnej obróbki cieplnej, odbiegających od uznanych reguł technologiczno-metalurgicznych.

Przedmiotem kolejnego podrozdziału 5.6 są badania udarności, wykonane klasycznym sposobem Charpy'ego. W sposób świadomy przyjęto niestandardowy kształt próbek, nieodpowiadający wytycznym zawartych w normach przedmiotowych, co już stanowi o unikalnym charakterze tej części badań. Celem tych działań było potwierdzenie możliwości uzyskania wiarygodnych i merytorycznie wartościowych wyników eksperymentu, bez konieczności uprzedniej, kosztownej obróbki mechanicznej śrub. Z uwagi na zróżnicowanie głębokości nacięcia karbu, wyniki eksperymentu przedstawiano w formie udarności mierzonej w  $[J/cm^2]$ , gdyż bezpośrednie porównywanie wartości pracy łamania, odczytanej w  $[J]$ , byłoby niemiarodajne. Celem zapewnienia właściwego położenia próbek walcowych na

podporach, przy ich pozycjonowaniu posługiwano się szablonem, którego rolą było zapewnienie położenia dna karbu w pozycji równoległej do czoła bijaka wahadła. Uzyskane wyniki zestawiono w formie tabelarycznej oraz na wspólnych wykresach z wynikami pomiarów twardości oraz nośności na rozciąganie. Rejestrowano także formę zniszczenia oraz dokonywano oględzin przełomów. Szczegółowe omówienie wyników próby oraz wzajemnych korelacji określonych, wyżej wymienionych właściwości mechanicznych, zamieszczono w treści monografii. Uzyskane wyniki wykazały, że w przypadku śrub stygnących po pożarze w sposób naturalny, zmiany udarności, ocenianie przez pryzmat bezpieczeństwa i integralności konstrukcji wydają się niegroźne i nie powinny powodować ryzyka jej gwałtownego, niekontrolowanego zniszczenia. Studzenie konstrukcji w sposób przyspieszony, jakie może mieć miejsce podczas akcji gaśniczej, w przypadku śrub nagranych powyżej temperatury  $A_{c1}$  skutkuje drastycznym spadkiem udarności, a tym samym wzrostem kruchości stali. Może to nieść za sobą poważne konsekwencje dla bezpieczeństwa, szczególnie w przypadku ustrojów obciążonych w sposób dynamiczny, bądź też zlokalizowanych na terenach sejsmicznych lub parasejsmicznych.

Podrozdział 5.7 dotyczy zrealizowanych badań mikrostrukturalnych, wykonanych przy użyciu cyfrowego mikroskopu świetlnego, skaningowego mikroskopu elektronowego wyposażonego w detektor elektronów wtórnych w Laboratorium Instytutu Budowy Maszyn Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Badania wzbogacono bogatą dokumentacją fotograficzną mikrostruktury w powiększeniu  $\times 100$  oraz zdjęciami śruby w stanie dostawy w powiększeniu  $\times 5000$  i  $\times 10000$ . Szczegółowo przeanalizowano i omówiono zmiany mikrostruktury udokumentowane na zaprezentowanych fotografiach, z uwzględnieniem podobieństw i różnic obrazu w odległościach od krawędzi trzpienia śruby, wynoszących odpowiednio: 3, 5, 7 i 9 mm. Celem potwierdzenia obecności w strukturze materiału węglików, przeprowadzono analizę fazową wybranych próbek, z wykorzystaniem metody dyfrakcji rentgenowskiej XRD. Korzystając z oprogramowania MountainsMap<sup>®</sup> dokonano analizy ilościowej mikrostruktury, określającej liczbę ziaren widocznych na zdjęciach, ich gęstość, średnią oraz równoważną powierzchnię ziarna. Analizy te przeprowadzono odrębnie dla fazy ferrytycznej i perlitycznej. Celem analizy było powiązanie zmiany wymiaru ziaren ze zmianami rezydualnych właściwości mechanicznych wybranych typoszeregów śrub. Szczegółowe omówienie analiz można znaleźć w treści pracy. Przeprowadzone badania wykazały, że to właśnie zmiany strukturalne zachodzące w materiale w trakcie ekspozycji na oddziaływania środowiskowe pożaru, leżą u podstaw obserwowanych zmian rezydualnych właściwości mechanicznych stali, wpływających na mechanikę zachowania się śruby pod obciążeniem i determinujących sposób zniszczenia konstrukcji w przypadku potencjalnej katastrofy. Jednoznacznie potwierdziły, iż sposób prowadzenia akcji ratowniczo-gaśniczej nie jest obojętny z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji oraz osób znajdujących się na terenie obiektu ogarniętego pożarem. Przeprowadzone badania mikrostrukturalne wykazały ich przydatność w procesie po-pożarowej oceny konstrukcji stalowych oraz próby rekonstrukcji scenariusza pożaru.

Przedostatnia część zrealizowanego programu badawczego obejmuje badania po-pożarowych właściwości mechanicznych określonych w statycznej próbie rozciągania próbek znormalizowanych, 5-krotnych. W tej części badań wyznaczono wartości po-pożarowe nośności granicznej na rozciąganie –  $f_{u,\theta,post}$ , granicy plastyczności –  $f_{y,\theta,post}$ , modułu sprężystości podłużnej Younga –  $E_{a,\theta,post}$ , odkształcenia granicznego przy maksymalnej sile –  $\varepsilon_{u,\theta,post}$ , odkształcenia w chwili zerwania –  $\varepsilon_{f,\theta,post}$ , wydłużenia względnego –  $A_{5,\theta,post}$  oraz przewężenia względnego przy zerwaniu –  $Z_{\theta,post}$ , określonych po pełnych cyklach wygrzewania i chłodzenia. Wyznaczono wartości współczynników retencji oraz współczynników odzysku. Uzyskane wyniki porównano z wynikami raportowanymi w literaturze. Prezentacji wyników badań stopnia zależności po-pożarowych właściwości mechanicznych stali śrubowej od wysokości temperatury, czasu wygrzewania oraz sposobu chłodzenia dokonano w sposób analogiczny do zastosowanego w przypadku badań kompletnych zestawów śrubowych, co ułatwiło porównanie wyników. Za miarę redukcji i-tej właściwości materiału po ekspozycji pożarowej przyjęto tzw. współczynnik retencji (odpowiednio:  $R_{Ea,\theta,post}$ ,  $R_{y,\theta,post}$ ,  $R_{u,\theta,post}$ ,  $R_{\varepsilon u,\theta,post}$ ,  $R_{\varepsilon f,\theta,post}$ ,  $R_{A5,\theta,post}$  oraz  $R_{Z,\theta,post}$ ), definiowany jako iloraz wartości określonej właściwości po przejściu pełnego cyklu termicznego, obejmującego wygrzewanie w temperaturze  $\theta$  [°C] przez założony okres czasu, a następnie schłodzenie, zgodnie z przyjętą metodą oraz wartości tej samej właściwości określonej dla próbki referencyjnej, nie poddawanej ekspozycji pożarowej. W przypadku stali konstrukcyjnych, wartość współczynnika retencji można utożsamić (w odniesieniu do wybranych wielkości, w stosunku do których ma zastosowanie), z iloczynem normowego współczynnika redukcyjnego (odpowiednio:  $k_{E\theta}$ ,  $k_{y\theta}$ ,  $k_{p\theta}$  czy  $k_{b\theta}$ ), określonego jak dla sytuacji pożaru, oraz odpowiadającego mu współczynnika odzysku:  $r_{E\theta}$ ,  $r_{y\theta}$ ,  $r_{p\theta}$  czy  $r_{b\theta}$ . Dodatkowo dokonano analizy przełomów i form zniszczenia. Każdorazowo uzyskane wartości współczynników retencji odniesiono do krzywych predykcyjnych odnoszących się do danej właściwości, zaczerpniętych z literatury. Przeprowadzone porównania wykazały w wybranych zakresach temperatury, pewne niezgodności z wynikami badań raportowanych przez innych badaczy. Do najważniejszych osiągnięć, związanych z realizacją tej części badań należy jednak zaliczyć obserwacje dotyczące zmienności wartości współczynnika sprężystości podłużnej stali, w zależności od przyjętych parametrów symulowanego pożaru oraz obranego scenariusza akcji gaśniczej. Rezultaty badań po-pożarowego modułu sprężystości podłużnej wykazały, iż w przypadku próbek stygnących w powietrzu, w zasadzie nie odnotowuje się jakichś znaczących spadków wartości modułu Younga, oznaczonych na próbkach po ich wychłodzeniu. Najmniejsza zarejestrowana wartość osiąga 88,3% wartości referencyjnej i odnosi się do próbek wygrzewanych przez 120' w temperaturze 1000°C. W przypadku próbek studzonych w wodzie, największa redukcja wartości modułu sprężystości podłużnej dotyczy próbek wygrzewanych przez 120' i 240' w temperaturze 750°C oraz 30' i 60' w temperaturze 800°C. W tym przypadku wartość po-pożarowego modułu Younga oscyluje na poziomie ok. 47,4-61,3% pierwotnej wartości. Jest to bez wątpienia efekt niejasnej i bardzo niejednorodnej struktury wewnętrznej materiału, uzyskanej po niepełnym hartowaniu. Obserwacje te pozostają w pewnej sprzeczności z dotychczasową wiedzą, podawaną w literaturze przedmiotu, w której stwierdza się, m.in.: „Ponieważ moduł sprężystości zależy od sił międzyatomowych, obróbka cieplna czy dodatki stopowe nieznacznie tylko wpływają na jego wartość. Moduł sprężystości zaliczyć można do właściwości metali,



*które są mało zależne od różnych czynników zewnętrznych. Wartość modułu sprężystości żelaza jest szczególnie duża w stosunku do modułu większości innych metali, co jest jedną z przyczyn, które czynią stopy żelaza tak cennymi tworzywami w technice”.*

Ostatni podrozdział tej części pracy dotyczy oceny możliwości wykorzystania pomiarów wybranych właściwości mechanicznych do szacowania wytrzymałości śrub na rozciąganie. Analizie porównawczej poddano wartości uzyskane poprzez bezpośredni pomiar w statycznej próbie rozciągania całych zestawów śrubowych oraz próbek proporcjonalnych 5-krotnych, jak i w sposób pośredni – poprzez konwersję wyników uzyskanych w testach twardości oraz statycznej próbie ścinania. Porównanie wyników wykazało, że wartości uzyskane w wyniku konwersji wyników uzyskanych w statycznej próbie ścinania znacząco odstają od tych, uzyskanych innymi metodami. W wyniku przeprowadzonej oceny, po gruntownej analizie przyczyn takiego stanu rzeczy, zdecydowanie nie rekomenduje się wykorzystywania wyników statycznej próby ścinania do szacowania doraźnej wytrzymałości śrub na zrywanie w ramach po-pożarowej oceny stanu technicznego konstrukcji, w kontekście jej przydatności do dalszej eksploatacji. W przypadku trzech pozostałych metod pomiarowych, uzyskane wyniki charakteryzują się zadowalającą zbieżnością, aż do próbek wygrzewanych w temperaturze 800°C przez 60' a następnie stygnących naturalnie w powietrzu (N/800/60) oraz próbek poddanych wygrzewaniu w tej samej temperaturze 800°C przez 30' i studzonych w sposób przyspieszony w wodzie (S/800/30). Warunki wygrzewania w obu przypadkach kojarzą się z temperaturą zachodzącej przemiany fazowej stali, włącznie. Powyżej tych granicznych przypadków obserwujemy pogłębiające się różnicowanie pomiędzy wynikami uzyskanymi w wyniku konwersji pomiarów twardości oraz pomiarów bezpośrednich w statycznej próbie rozciągania. Najwyższe wartości w każdym z przypadków uzyskano w próbie rozciągania próbek znormalizowanych, natomiast najniższe – niemal zawsze poprzez konwersję pomiarów twardości. Pomiar nośności w próbie rozciągania kompletnych zestawów śrubowych, w przeważającej liczbie przypadków zwracał wartości pośrednie. W treści pracy szczegółowo omówiono potencjalne przyczyny odnotowanych rozbieżności.

Rozdział 6 pracy, o objętości 4 stron (str. 187-190) zawiera podsumowanie pracy, podkreślając znaczącą rolę połączeń śrubowych w konstrukcjach stalowych, zapewniających im oczekiwaną integralność i stateczność. W wielokryterialnych analizach i badaniach uwzględniono nie tylko wartości maksymalnej temperatury, jaką osiągnęły śruby w warunkach symulowanego incydentu pożarowego, ale także czas wygrzewania oraz zastosowaną metodę chłodzenia, odpowiadającą wariantowym scenariuszom zakończenia pożaru. W odróżnieniu od badań raportowanych w literaturze dostosowano czas ekspozycji termicznej do obowiązujących w Unii Europejskiej przepisów techniczno-budowlanych, stosując cztery różne okresy wygrzewania próbek – odpowiednio 30', 60', 120' i 240'. W tym zakresie praca bez wątpienia wniosła pierwiastek oryginalności do dotychczasowego stanu wiedzy w niniejszym obszarze. Przy planowaniu programu badań autorowi przyświecała idea możliwości jak najpełniejszego ich wykonania bez konieczności angażowania specjalistycznych narzędzi i urządzeń oraz uniknięcia kosztownej obróbki mechanicznej. Miało to wykazać możliwość przeprowadzenia niektórych z nich niemal w czasie

rzeczywistym, w warunkach terenowych, przy minimalizacji kosztów dodatkowych. W tym zakresie, przyjęte rozwiązania i procedury badawcze można uznać w części za unikalne, stanowiące indywidualny wkład myśli technicznej autora w proces oceny właściwości materiałów konstrukcyjnych, podkreślający ich aplikacyjny charakter i mające wymiar oryginalnego osiągnięcia naukowego. Zastosowanie niestandardowych próbek w testach udarności, nie zmieniło charakteru wyników oraz ich poprawności w wymiarze jakościowym, co potwierdziło przydatność relatywnie nieskomplikowanych metod badawczych do eksperckiej oceny, istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji, właściwości użytkowych śrub i innych elementów stalowych, w kontekście np. możliwości ich dalszego wykorzystania w obiektach modernizowanych po pożarze. Wymaga podkreślenia, że zrealizowane badania niszczące uzupełniono wnikliwymi badaniami mikrostrukturalnymi i analizami modelowymi z wykorzystaniem oprogramowania JMatPro, które swoim zakresem wykraczają poza klasyczne zagadnienia inżynierii lądowej, wymagające poszerzonej wiedzy dotyczącej zagadnień z obszaru metalurgii i inżynierii materiałowej. Należy przypomnieć, że przedmiotem badań autora były śruby wykonane ze stali nie objętej żadnymi dokumentami normatywnymi, co wymagało nieco bardziej zindywidualizowanego podejścia badawczego i większej kreatywności, z uwagi na brak możliwości odniesienia. Ocenia się, iż zaprezentowane badania mogą być wykorzystane na potrzeby eksperckiej oceny wpływu środowiskowych oddziaływań pożaru na własności mechaniczne stali po ekspozycji śrubowej. Zwraca się uwagę, iż z uwagi na złożoność zagadnienia, jedynie podejście holistyczne, polegające na kompleksowej analizie wyników wielokryterialnych prac badawczych, popartych wynikami obliczeń wykonanych przy użyciu specjalistycznych narzędzi numerycznych, jest w stanie zagwarantować wiarygodną ocenę przydatności stali uszkodzonej w pożarze, (w tym w szczególności ulepszanej cieplnie stali śrubowej), do dalszego wykorzystania. Jak zgodnie stwierdzili Recenzenci wydawniczy, prezentowana do oceny praca jest obecnie przypuszczalnie jedynym dostępnym na rynku, tak kompleksowym opracowaniem, traktującym w sposób syntetyczny zagadnienia po-pożarowej degradacji właściwości stali śrubowych, ulepszanych cieplnie w procesie produkcyjnym. Autor zdaje sobie sprawę z faktu, iż zaproponowany i zrealizowany zakres badań nie wyczerpuje pełnego pakietu możliwości stojących przed badaczami i ich nie ogranicza. Stanowi efekt pewnego uzasadnionego kompromisu, wynikającego z ograniczeń technicznych i finansowych.

W rozdziale 7, zawartym na stronach 191-194, zamieszczono wnioski końcowe oraz zaproponowano kierunki dalszych badań. Wskazuje się na potrzebę dokumentowania i gromadzenia wyników prac badawczych prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych na świecie, celem stworzenia jednej spójnej bazy danych, odpowiadających poszczególnym klasom wytrzymałościowym śrub, które w późniejszym etapie mogłyby zostać przykładowo wykorzystane w analizach niezawodnościowych, umożliwiając chociażby wyznaczenie nowych wartości współczynników redukcyjnych do nośności połączeń śrubowych w sytuacji pożarowej, kalibrację (przy założonym poziomie niezawodności) częściowego współczynnika bezpieczeństwa, zależnego od wartości maksymalnej temperatury albo też kalibrację zupełnie nowego współczynnika, stosowanego wyłącznie w przypadku oceny stanu technicznego istniejących konstrukcji, po przebytych incydencie pożarowym.

Wykaz bibliograficzny, złożony z 271 pozycji zamieszczono na stronach 195-202, po którym zamieszczono dwustronicowe streszczenia w języku polskim (str. 203-204) i angielskim (str. 205-206).

#### 4.2.3 Syntetyczne podsumowanie istoty osiągnięcia

Istotę przedstawionego do oceny pierwszego osiągnięcia można zawrzeć w następujących podpunktach, definiujących najistotniejszy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport:

- a) wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie, iż właściwości mechaniczne stali śrubowej, w wyniku jej ekspozycji na oddziaływania środowiskowe symulowanego pożaru, ulegają zmianie. Wielkość zmian opisują wyznaczone współczynniki retencji, definiowane jako iloraz wartości określonej właściwości po pożarze, oraz wartości tej samej właściwości, określonej na próbce referencyjnej, w stanie wyjściowym. Stopień degradacji poszczególnych właściwości zależy od wysokości maksymalnej temperatury osiągniętej w pożarze, czasu ekspozycji termicznej oraz przyjętego sposobu i tempa chłodzenia,
- b) wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie, iż niemal w całym zakresie objętym badaniami, pomierzone wartości nośności po-pożarowej śrub na zrywanie i ścinanie, niezależnie od czasu symulowanej ekspozycji pożarowej oraz zastosowanej metody chłodzenia, są wyższe od nominalnych nośności normowych, przyjmowanych na etapie projektowania konstrukcji. Pewne zaburzenia tego stanu występują w sytuacji, kiedy temperatura stali w pożarze przekroczy 700°C. Jest to cenne spostrzeżenie w aspekcie oceny bezpieczeństwa konstrukcji, które przetrwały pożar,
- c) wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie, iż szybkość degradacji danej właściwości rezydualnej ocenionej po pożarze jest mniejsza od szybkości degradacji tej samej właściwości w warunkach pożaru,
- d) wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie, iż moduł sprężystości podłużnej, pomimo swojej zależności od sił międzyatomowych, nie jest właściwością niezmienną, mało podatną na działanie różnych czynników zewnętrznych,
- e) wykazanie i eksperymentalne potwierdzenie, że współczynnik korelacji  $\alpha$ , opisujący relację zachodzącą między twardością stali a jej wytrzymałością na rozciąganie, przyjmowany powszechnie na poziomie 3,38-3,55 (w zależności od stosunku  $f_y/f_u$ ), w przypadku stali śrubowej po incydencie pożarowym, szczególnie w sytuacji, gdy temperatura konstrukcji w pożarze osiągnęła wartość 700°C lub ją przekroczyła, znacząco wykracza poza ww. zakres,
- f) wykazanie, że krzywe predykcyjne dostępne w literaturze, służące do przewidywania po-pożarowych właściwości mechanicznych stali śrubowej nie mają charakteru narzędzi uniwersalnych. Są one dopasowane wyłącznie do wyników badań konkretnej partii wyrobów i nie odzwierciedlają w sposób poprawny charakterystyki zmienności analogicznych właściwości śrub wykonanych nominalnie w tej samej klasie

wytrzymałościowej, ale z materiału o innym składzie chemicznym lub wyprodukowanych w procesie wytwórczym o odmiennych parametrach obróbki cieplnej,

- g) wykazanie, że możliwe jest szacowanie wartości niektórych po-pożarowych właściwości mechanicznych śrub w sposób pośredni, na podstawie wyników innych badań, w sposób bezpośredni lub pośredni skorelowanych. Dużą ostrożność należy zachować jedynie w stosunku do możliwości wykorzystania w tym celu wyników statycznej próby ścinania, które nie korelują poprawnie z wartościami wytrzymałości na rozciąganie.

Ponadto:

- h) udowodniono, iż wykorzystanie niestandardowych próbek walcowych w testach udarnośći nie wpływa negatywnie na jakość i wiarygodność uzyskiwanych wyników, a jednocześnie pozwala uniknąć kosztownej i pracochłonnej obróbki mechanicznej próbek. Od strony praktycznej potwierdziło to możliwość prowadzenia badań w warunkach terenowych, przy niewielkim nakładzie prac dodatkowych,
- i) potwierdzono możliwość wykorzystania pakietu JMatPro, jako narzędzia pomocniczego w analizie zmian mikrostrukturalnych stali, ułatwiającego interpretację wyników innych badań oraz analizę samego obrazu mikrostruktury,
- j) zaobserwowano, iż wygrzewanie w temperaturze 800°C prowadzi zwykle do uzyskania przypadkowej i niepewnej struktury materiału, co z reguły skutkuje trudnymi do przewidzenia i niejednoznacznymi właściwościami po-pożarowymi materiału oraz znacznymi trudnościami w interpretacji wyników, co zostało potwierdzone eksperymentalnie na drodze badań niszczących, mikrostrukturalnych oraz analiz modelowych z wykorzystaniem oprogramowania JMatPro.

## **5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej**

### **5.1 Współpraca z Michigan State University, East Lansing, USA**

Moje kontakty naukowe z Michigan State University w Stanach Zjednoczonych rozpoczęły się wraz z udziałem w konferencji „6th International Conference “Structures in Fire”, jaka odbyła się w East Lansing, USA, w dniach 2-4 czerwca 2010. Dzięki kontaktom tam zawartym zostałem zaproszony do udziału w ramach Europejskiego Programu Współpracy w Dziedzinie Badań Naukowo-Technicznych COST, Akcja TU0904 – Integrated Fire Engineering and Response (IFER), jako członek grupy roboczej WG2 – Structural Safety. W ramach zadziergniętych relacji, dzięki pozyskaniu finansowania w formie wyjazdowego stypendium naukowego “Programu Rozwojowego Politechniki Warszawskiej”, odbyłem w Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, w okresie 8 maja – 8 lipca 201, dwumiesięczny staż naukowy, w ciągu którego brałem osobisty udział w przygotowaniu oraz realizacji badań pożarowych stropów zespolonych, drewnianych belek kratownicowych oraz słupów z profili zamkniętych, wypełnionych betonem. Wraz z prof. Venkateshem Kodurem opracowałem także prezentację nt. „Fundamentals of Fire Protection”, która przez szereg lat była wykorzystywana do zajęć dydaktycznych prowadzonych w Dept. of Civil & Environmental Engineering, Michigan State University, USA oraz wykładów z przedmiotu fakultatywnego „Ochrona Konstrukcji Metalowych przed Korozją i Ogniem”, którego program jest w całości autorskim dziełem wnioskodawcy, prowadzonego w macierzystej jednostce. Byłem też inicjatorem podpisania i osobą sprawującą nadzór nad realizacją postanowień *Memorandum of Understanding*, podpisanego pomiędzy Dept. of Civil and Environmental Engineering Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA i Wydziałem Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, oraz organizatorem wizyty naukowej w 2013 roku prof. dr. hab. inż. Artura Zbiciaka, której realizacja była możliwa dzięki niniejszemu porozumieniu.

### **5.2 Współpraca z University of Ulster, Fire Research Laboratories FireSERT, Jordanstown Campus, Newtownabbey, UK**

Moje kontakty naukowe z prof. Farisem Ali rozpoczęły się w trakcie wspomnianej wcześniej konferencji „6th International Conference “Structures in Fire” w East Lansing oraz rozwinęły się w trakcie aktywności prowadzonej w ramach akcji COST TU0904 – Integrated Fire Engineering and Response. Zaowocowały m.in. moim udziałem w trwającej 2 tygodnie (3-15 grudnia 2013) krótkoterminowej misji naukowej w tamtejszym laboratorium, gdzie miałem przyjemność pracować nad przygotowaniem badań pożarowych fragmentów konstrukcji ustroju słupowo-płytowego budynku w skali naturalnej. Dzięki zdobytym, kontaktom oraz zaufaniu zostałem zaproszony do recenzji artykułów naukowych w Journal of Structural Fire Engineering (70 pkt. MNiSW 2024), w którym prof. Faris Ali pełni do dzisiaj funkcję redaktora naczelnego, natomiast prof. Venkatesh Kodur z Michigan State University – funkcję zastępcy redaktora naczelnego.

### **5.3. Współpraca z Auburn University, Auburn, Alabama, USA**

Moja współpraca z Auburn University rozpoczęła się wraz wyjazdem na 6-miesięczne naukowe stypendium Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta w ramach programu Fulbright Senior Advanced Research Awards 2013-14 (1 lutego – 31 lipca 2014). Pod kierunkiem prof. dr. inż. Andrzeja Nowaka, dr. h.c. PW, zajmowałam się studiowaniem zagadnień dotyczących oceny niezawodności konstrukcji obiektów infrastrukturalnych w kontekście ich bezpieczeństwa pożarowego, procedur oceny ryzyka zagrożenia pożarowego, kalibracji częściowych współczynników bezpieczeństwa dla nadzwyczajnych sytuacji projektowych, w tym związanych z wystąpieniem pożaru i związanych z oceną po pożarze, jak również zasadami ustalania wielkości obciążenia ogniowego konstrukcji opartego na zasadach prawdopodobieństwa. Współpraca zaowocowała wystąpieniami konferencyjnymi oraz wspólnymi publikacjami. Prof. Andrzej Nowak został ponadto zaproszony przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Warszawskiej do sporządzenia recenzji wydawniczej monografii naukowej mojego autorstwa, stanowiącej drugie osiągnięcie przedstawione do oceny w niniejszym postępowaniu awansowym.

### **5.4. Współpraca z Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie**

Współpraca z dr. hab. inż. Marcinem Wachowskim, prof. WAT i Instytutem Budowy Maszyn Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie rozpoczęła się w momencie rozpoczęcia badań metalograficznych stali śrubowej, po jej ekspozycji pożarowej. Zaowocowała wspólnymi badaniami oraz publikacją w czasopiśmie naukowym „Materials” MDPI (140 pkt. MNiSW 2024)

### **5.5 Współpraca ze Szkołą Główną Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie**

Współpraca z Pracownią Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Centrum Wodnego Szkoły Główniej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie rozpoczęła się w momencie rozpoczęcia badań statycznej próby rozciągania i statycznej próby ścinania zestawów śrubowych po ekspozycji pożarowej. Kontakty naukowe zawarte w trakcie prac w laboratorium Centrum Wodnego SGGW zaowocowały również współpracą nad publikacją w czasopiśmie naukowym „Energies” MDPI (140 pkt. MNiSW 2024), przy udziale kolegów z Politechniki Częstochowskiej.

### **5.6 Współpraca ze Szkołą Główną Służby Pożarniczej - Akademią Pożarniczą w Warszawie**

Współpraca z Instytutem Inżynierii Bezpieczeństwa Szkoły Główniej Służby Pożarniczej/Akademii Pożarniczej w Warszawie została nawiązana w trakcie udziału w akcji COST TU0904 – Integrated Fire Engineering and Response i zaowocowała licznymi wspólnymi publikacjami oraz wystąpieniami konferencyjnymi.

## **5.7 Współpraca z innymi jednostkami organizacyjnymi w Politechnice Warszawskiej**

Współpraca wewnętrzna z innymi jednostkami organizacyjnymi Politechniki Warszawskiej obejmowała wykonanie badań materiałowych aluminium i stali, realizowanych w ramach prac tematycznie związanych z zakresem monografii, zgłoszonej do oceny jako pierwsze osiągnięcie naukowe. Zostały one zrealizowane w Laboratorium Wytrzymałościowym Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

W przypadku prac związanych z monografią, stanowiącą drugie osiągnięcie naukowe zgłoszone do oceny, badania składu chemicznego stali śrubowej wykonano w Laboratorium Badań dla Przemysłu Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, zaś obliczenia modelowe zrealizowane z wykorzystaniem udostępnionej licencji oprogramowania JMatPro przeprowadzono w Pracowni Komputerowej tegoż samego Wydziału.

Poza wspomnianymi wyżej monografiami, współpraca ta zaowocowała licznymi publikacjami pośrednimi, jakie ujrzały światło dzienne w czasie rzeczywistym, w trakcie prowadzonych badań.

## **6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę**

### **6.1 Działalność dydaktyczna**

Moja działalność dydaktyczna rozpoczęła się na ostatnich dwóch semestrach studiów, kiedy to, z uwagi na wyniki w nauce zaproponowano mi funkcję stażysty-asystenta w ówczesnym Zakładzie Konstrukcji Metalowych Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Warszawskiej, kierowanym przez prof. dr. hab. inż. Wojciecha Żółtowskiego. Uczestniczyłem wówczas jako współprowadzący ćwiczenia projektowe na pierwszych semestrach nauczania przedmiotu „Konstrukcje Metalowe”. Po ukończeniu studiów, za zgodą Kierownika ZKM podjąłem pracę w Przedsiębiorstwie Wielobranżowym „PROBLEM” Sp. z o. o., specjalizującym się w projektowaniu i realizacji obiektów przemysłowych oraz obiektów użyteczności publicznej o konstrukcji stalowej, celem odbycia odpowiedniej praktyki i zdobycia doświadczenia zawodowego. Moi ówcześni mentorzy, posiadający uprawnienia budowlane, wyznawali zasadę, że żeby być dobrym dydaktykiem i badaczem, to trzeba przede wszystkim być dobrym inżynierem, który swoją wiedzę i umiejętności czerpie nie tylko z lektury książek, ale z własnego doświadczenia. Zostałem zatrudniony na stanowisku, na którym w ramach obowiązków służbowym powierzono mi równoległe zadania asystenta projektanta oraz inżyniera budowy. Zasady przyjęte w przedsiębiorstwie bazujące na formule „projektuj i buduj” przewidywały, że każdy inżynier jest odpowiedzialny za stworzone przez siebie dzieło od początku do końca – od przyjęcia koncepcji projektowej, zgodnej z zamówieniem klienta, poprzez projektowanie konstrukcyjno-budowlane, bezpośredni nadzór nad realizacją prac, aż po sformalizowany odbiór obiektu, zwieńczony decyzją o pozwoleniu na użytkowanie. Taki sposób pracy pozwalał na przejście wszystkich możliwych etapów procesu inwestycyjnego oraz naukę na własnych błędach czy pomyłkach, które raz popełnione nie były powielane przy kolejnych projektach. Jako wyróżniający się pracownik, po 3 latach pracy, zostałem oddelegowany na budowę hali produkcyjnej dla firmy „Steinbrügge und Berninghausen” w Bremie, gdzie nadzorowałem montaż konstrukcji wytworzonej na podstawie projektu mojego autorstwa. Należy nadmienić, iż projekt ten był weryfikowany przez moich mentorów z Politechniki Warszawskiej – prof. dr. inż. inż. Wojciecha Żółtowskiego oraz dr. inż. Lecha Klestę.

Po 4 latach pełnoetatowej pracy w przemyśle, za namową prof. dr. hab. inż. Wojciecha Żółtowskiego, z dniem 1 września 1998 r., powróciłem do pracy w Politechnice Warszawskiej, gdzie zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego, gdzie pracuję nieprzerwanie do chwili obecnej, przy czym od 1 października 2007 r., w związku z uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych – na stanowisku adiunkta. W tym czasie prowadziłem zajęcia z przedmiotów „Konstrukcje Metalowe I, II i III”, „Konstrukcje Metalowe Specjalne”, „Ochrona Konstrukcji Metalowych przed Korozją i Ogniem”, „Proces Inwestycyjny w Budownictwie”, „Seminarium Dyplomowe I stopnia” i „Seminarium Dyplomowe II stopnia” dla studentów studiów polskojęzycznych. Tuż po uruchomieniu studiów anglojęzycznych na kierunku „Civil Engineering”, jako prekursor, przez kilka semestrów prowadziłem ćwiczenia projektowe z przedmiotu „Metal Structures I”



i „Metal Structures II” na studiach I stopnia oraz „Special Metal Structures”, na studiach II stopnia, opracowując na bieżąco nowe materiały dydaktyczne do części projektowej tych przedmiotów. W kolejnych latach prowadziłem też zajęcia z przedmiotu „Diploma Seminar” na studiach II stopnia.

W trakcie pracy w Politechnice Warszawskiej wypromowałem 46 inżynierów i 76 magistrów lub magistrów inżynierów, pełniłem funkcję recenzenta/opiniującego kolejnych 29 prac dyplomowych oraz zasiadałem jako członek komisji egzaminacyjnej w 151 komisjach dyplomowych.

Za swoją działalność dydaktyczną byłem wielokrotnie nagradzany i wyróżniany, zaś w roku 2013 zostałem odznaczony Medalem Komisji Edukacji Narodowej.

## **6.2 Działalność organizacyjna i na rzecz środowiska inżynierskiego**

W ramach współpracy z otoczeniem społecznym, poczynawszy od roku 2010, dzięki zaufaniu jakim obdarzyli mnie członkowie samorządu zawodowego podjąłem aktywną działalność na rzecz środowiska inżynierów budownictwa, wchodząc w skład organów statutowych Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa (w latach 2010-2022) oraz Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa (w latach 2018-2022). W trakcie współpracy z Mazowiecką Okręgową Izbą Inżynierów budownictwa pełniłem funkcję członka-egzaminatora Okręgowej Komisji Kwalifikacyjnej, nadającej uprawnienia budowlane oraz opiniującej wnioski o tytuł Rzeczoznawcy Budowlanego, w tym w latach 2016-2018 jako Przewodniczący Specjalistycznego Zespołu Kwalifikacyjnego ds. Rzeczoznawstwa OKK MOIIB. Ponadto w latach 2010-2014 byłem członkiem Komisji ds. Współpracy z Uczelniami, Organami Administracji Publicznej i Stowarzyszeniami Naukowo-Technicznymi przy Mazowieckiej Okręgowej Izbie Inżynierów Budownictwa. W latach 2018-2022, po powołaniu w skład zespołu Krajowej Komisji Kwalifikacyjnej, pełniłem funkcję Z-cy Przewodniczącego Krajowej Komisji Kwalifikacyjnej Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa. Ponadto byłem delegatem na Zjazd Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa w kadencji 2010-2014, 2014-2018, 2018-2022 i 2022-2026 oraz delegatem na Krajowe Zjazdy Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa w kadencji 2018-2022. Podczas działalności w PIIB zajmowałem się opiniowaniem wniosków o tytuł Rzeczoznawcy Budowlanego, prowadzeniem rozmów z kandydatami do tytułu oraz postępowań kwalifikacyjnych, przygotowaniem lub weryfikacją zestawów egzaminacyjnych na cykliczne (2 razy w roku) egzaminy testowe na uprawnienia budowlane, jako przedstawiciel/ekspert PIIB brałem też m.in. udział w pracach Grupy Roboczej ds. Sektorowych Ram Kwalifikacji działającej w ramach Sektorowej Rady ds. Kompetencji w Budownictwie, w dialogu technicznym Instytutu Badań Edukacyjnych w ramach programu: „Pilotażowe dostosowanie trzech wybranych kwalifikacji uregulowanych do wymagań ustawy z dnia 22 grudnia 2015 r. o Zintegrowanym Systemie Kwalifikacji w zakresie odnoszącym się do kwalifikacji uregulowanych” oraz w projekcie „Pilotażowe dostosowanie kwalifikacji uregulowanej w zakresie „Uprawnienia budowlane w specjalności konstrukcyjno-budowlanej do kierowania robotami budowlanymi bez ograniczeń” do wymagań ustawy z dnia 22 grudnia 2015 r. o Zintegrowanym Systemie Kwalifikacji”, realizowanym przez Instytut Badań Edukacyjnych w Warszawie.

Okres działalności w organach samorządu zawodowego wspominam z wielką satysfakcją, ponieważ pozwalał mi na bieżący, bezpośredni kontakt z młodymi adeptami sztuki budowlanej, dopiero w pełni rozpoczynającymi swoją zawodową ścieżkę oraz doświadczonymi inżynierami, którzy po kilkunastu latach kariery wnioskowali o uznanie kwalifikacji uprawniających do nadania tytułu rzeczoznawcy. Pod każdym względem były to doświadczenia inspirujące, podobnie, jak kontakt ze studentami na uczelni.

W ramach działalności organizacyjnej w Politechnice Warszawskiej pełniłem funkcję członka Rady Wydziału Inżynierii Lądowej w kadencjach 2008-2012, 2012-2016 i 2016-2020. Wchodziłem także w skład Kolegium Elektorów do wyboru dziekana i prodziekanów Wydziału Inżynierii Lądowej na kadencję 2016-2020. Od roku 2024 z satysfakcją wykonuję obowiązki wydziałowego Społecznego Inspektora Pracy.

### **6.3 Działalność zawodowa i kontakty z otoczeniem gospodarczo-społecznym**

Z dniem 2 stycznia 1997 r., równoległe z pracą na etacie, rozpocząłem prowadzenie jednoosobowej działalności gospodarczej pod nazwą „Biuro Konstrukcyjne – Paweł Król”, którą prowadziłem nieprzerwanie do 31 grudnia 2023 r., a której przedmiotem było świadczenie usług w zakresie projektowania konstrukcyjnego oraz nadzoru nad pracami budowlanymi, po uzyskaniu uprawnień budowlanych w 2000 r. oraz tytułu rzeczoznawcy budowlanego – w 2014 r., na własne nazwisko. Wraz z nabraniem doświadczenia zawodowego, zakres przedmiotowej działalności rozszerzono o wydawanie orzeczeń, opinii oraz opracowywanie ekspertyz technicznych. Znaczącą część klientów stanowili klienci instytucjonalni i przedsiębiorcy, zaś niszową – inwestorzy prywatni. Przez wiele lat działalność bazowała na stałej współpracy z tymi samymi partnerami gospodarczymi, stanowiącymi mikro, małe lub średnie przedsiębiorstwa, w tym m.in.: firmy działające w obszarze telekomunikacji, budownictwa kubaturowego czy budownictwa infrastrukturalnego. Do najważniejszych z nich można zaliczyć np.: GASTEL (obecnie HERKULES) Sp. z o. o., LINDAB Sp. z o. o., UP-TELECOM Sp. z o. o., VERTICAL Sp. z o. o., CONSTRUCTION Sp. z o. o., BYRBE LOOBY PARTNERS (BLP) – CONSULTING ENGINEERS czy LEROY-MERLIN Sp. z o. o., na rzecz których wykonano znaczną większość opracowań projektowych i eksperckich, wymienionych dalej z nazwy w punkcie 5. Nieco mniejszą liczebnie część prac stanowią opracowania wykonane na zlecenie sądów i prokuratury. Z uwagi na intensyfikację obowiązków akademickich zawiesiłem działalność gospodarczą z dniem 1 stycznia 2024 r., kontynuując jednak stałą współpracę na zasadzie umowy o pracę w spółce CONSTRUCTION, gdzie jestem zatrudniony na etacie eksperta – konsultanta, do chwili obecnej. Znaczna część opracowań eksperckich i projektowych wykonywanych przez Spółkę CONSTRUCTION dotyczy obszaru konstrukcji przemysłowych, realizowanych na zamówienie czołowych krajowych przedsiębiorstw energetycznych: PGNiG Termika S.A., ENEA Wytwarzanie SP. z o.o., PGE Giek S.A. czy ORLEN S.A. Zestawienie wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców opracowań projektowych konstrukcyjnych i technologicznych w liczbie 266 sztuk, oraz ekspertyz, opinii i ocen, w liczbie 131 sztuk zamieszczono w wykazie osiągnięć (pkt.III.5). Zakres pozycji zawartych

w wykazie należałoby rozszerzyć o opracowania wykonane na rzecz osób prywatnych, których nie uwzględniono w zestawieniu.

#### **6.4 Opieka naukowa nad studentami studiów doktoranckich**

1. mgr inż. Piotr Flakiewicz, student studiów doktoranckich na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie; 2016-2022; opiekun naukowy: dr hab. Monika Wągrowa, emer. prof. nzw. SGGW

#### **6.5 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego**

1. mgr inż. Magdalena Papadopoulos-Woźniak, *Ocena stateczności regałów wysokiego składowania ze stalowych kształtowników giętych*, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, promotorstwo pomocnicze w przewodzie doktorskim, 2016–2022, promotor: prof. dr hab. inż. Marian Giżejowski; doktorantka do chwili obecnej nie przystąpiła do obrony pracy doktorskiej
2. mgr inż. Jarosław Wójt, *Nośność i sztywność węzłów z połączeniami zaczepowymi w regałach wysokiego składowania ze stalowych kształtowników giętych*, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, promotorstwo pomocnicze w przewodzie doktorskim, 2016–2022, promotor: prof. dr hab. inż. Marian Giżejowski; doktorant do chwili obecnej nie przystąpił do obrony pracy doktorskiej

#### **6.6 Działalność w zakresie popularyzacji nauki i propagowania wiedzy**

Działalność we wspomnianym obszarze, polegającą na współpracy przy opracowaniu podręczników akademickich oraz poradników i innych publikacji o charakterze technicznym, utrwalonych w formie analogowej lub cyfrowej rozpocząłem jeszcze przed uzyskaniem stopnia doktora, realizując ją w części w ramach współpracy z partnerem gospodarczym – firmą „Lindab” Sp. z o.o. Efektem tej działalności są opracowania wymienione w pkt.II.5 wykazu osiągnięć.

#### **6.7 Działalność naukowa po doktoracie nie związana w sposób bezpośredni z tematyką osiągnięć zgłoszonych do oceny**

W ramach opieki naukowej nad doktorantami moje zainteresowania naukowe dotyczyły najbardziej bliskich mi zagadnień tematycznych – związanych zarówno z połączeniami, jak i konstrukcjami cienkościennymi w szerszym rozumieniu. Zainteresowania te pokrywały się z tematyką prac doktorskich doktorantów wymienionych w punkcie 6.5 autoreferatu, co pozwoliło mi z pełnym przekonaniem i nieskrywaną satysfakcją pełnić funkcję promotora pomocniczego w obu przypadkach. Badania te dotyczyły zagadnień nośności i sztywności jednostronnych i dwustronnych węzłów zaczepowych belka-słup oraz stateczności smukłych słupów z perforowanych profili cienkościennych o przekroju sigma. Efektywnie planowałem kolejne etapy badań, brałem udział w ich przygotowaniu i realizacji. Efektem tych prac były wystąpienia konferencyjne oraz publikacje współautorskie, wymienione

szczegółowo w wykazie osiągnięć (odpowiednio w pkt.II.4 i pkt.II.7). Liczne wystąpienia konferencyjne na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych, wymienione szczegółowo w pkt. II.7 wykazu osiągnięć, były naturalną konsekwencją prowadzonej działalności badawczej oraz eksperckiej i pozwalały na prezentację przed szerszym gremium wyników prac realizowanych w ramach aktywności indywidualnej lub zespołowej, jako członek zespołów badawczych. Zestawienie zrealizowanych prac badawczych zamieszczono w pkt.II.9, pkt.II.15 i pkt.III.2 wykazu osiągnięć.

W wyniku uznania posiadanego dorobku naukowego i znaczącego doświadczenia zawodowego zostałem zaproszony do grona członków Kolegium Redakcyjnego oraz Rady Programowej dwóch czasopism naukowo-technicznych (pkt.II.12 wykazu osiągnięć), Komitetu Nauki Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, grup roboczych Komitetów Technicznych PKN, ISO, ECCS i CEN. Zostałem także powołany na eksperta Sekcji Konstrukcji Metalowych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, (pkt.II.10).

W ramach uzyskanych stypendiów naukowych odbyłem dwa kilkumiesięczne staże naukowe w uznanych ośrodkach akademickich, w Stanach Zjednoczonych, jeden sfinansowany ze środków Politechniki Warszawskiej i Europejskiego Funduszu Społecznego, drugi zaś – z prestiżowego programu Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta. Szczegółowe zestawienie odbytych staży i kursów naukowych zamieszczono w pkt.II.11 wykazu osiągnięć.

Wzrost rozpoznawalności, związany m.in. z faktem uczestnictwa w programach europejskich i międzynarodowych (pkt.II.14 wykazu osiągnięć) zaowocowały zaproszeniami do udziału w pracach komitetów organizacyjnych i naukowych konferencji (pkt.II.8), opracowania recenzji referatów konferencyjnych i artykułów złożonych do czasopism naukowych – krajowych i zagranicznych. Zestawienie recenzowanych prac zamieszczono w wykazie osiągnięć (pkt.II.13).

## **7. Inne osiągnięcia, w tym wyróżnienia, nagrody i odznaczenia**

1. Nagroda Indywidualna Stopnia III Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w roku 2007, 2008 r.
2. Nagroda Ministra Infrastruktury za pracę doktorską, 2008 r.
3. Wyróżnienie Ministra Infrastruktury za promotorstwo wyróżnionej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr inż. Jana Kowalczyka, 2009 r.
4. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr inż. Marcina Godlewskiego, 2009 r.
5. 'Złota Kreda' - nagroda Rady Samorządu Studentów Politechniki Warszawskiej dla najlepszego nauczyciela akademickiego Wydziału Inżynierii Lądowej w grupie pracowników prowadzących ćwiczenia, laboratoria, projekty, 2009 r. (pierwsza edycja nagrody)

6. Nagroda Zespołowa Stopnia I Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w roku akademickim 2008/2009, 2010 r.
7. Nagroda Indywidualna Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w roku akademickim 2008/2009, 2010 r.
8. Medal Brązowy za Długoletnią Służbę, nadany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej, 2010 r.
9. Uzyskanie wyjazdowego stypendium naukowego dla nauczycieli akademickich Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej w ramach "Programu Rozwojowego Politechniki Warszawskiej", współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego – działanie 4.1.1 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, 2011
10. Nagroda Indywidualna Stopnia II Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2010-2011, 2012 r.
11. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej inżynierskiej p. inż. Michała Felińskiego, 2013 r.
12. Medal Komisji Edukacji Narodowej, nadany przez Ministra Edukacji Narodowej, 2013 r.
13. Srebrna Odznaka Honorowa Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa, 2013 r.
14. Uzyskanie naukowego stypendium wyjazdowego Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta w ramach programu Fulbright Senior Advanced Research Awards 2013-14
15. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr. inż. Michała Felińskiego, 2015 r.
16. Nagroda Zespołowa Stopnia III Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w roku 2015, 2016 r.
17. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz warszawskich oddziałów Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej oraz Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr. inż. Jacka Kurzyny, 2016 r.
18. Złota Odznaka Honorowa Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa, 2016 r.
19. Nagroda honorowa Kolegium Redakcyjnego miesięcznika „Inżynieria i Budownictwo” za wyróżniającą się współpracę z redakcją w 2016 roku – za podejmowanie dyskusji na łamach „Inżynierii i Budownictwa” – dr inż. Paweł A. Król, dr. inż. Andrzej Pogorzelski, mgr inż. Jan Sieczkowski; za wypowiedzi w zeszytach nr 3/2016 i 6/2016, 2017 r.

20. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz warszawskich oddziałów Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej oraz Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr. inż. Marcina Kinaszewskiego, 2017 r.
21. Nagroda Indywidualna Stopnia II Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w latach 2016-2017, 2018 r.
22. Nagroda Zespołowa Stopnia II Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2016-2017, 2018 r.
23. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz warszawskich oddziałów Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej oraz Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr. inż. Piotra Felińskiego, 2018 r.
24. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej dla zwycięzcy konkursu na wyróżniającego się pracownika Wydziału Inżynierii Lądowej w roku akademickim 2017/2018, 2018 r.
25. Nagroda Zespołowa Stopnia III Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2018-2019, 2020 r.
26. List gratulacyjny Dyrektora Departamentu Architektury, Budownictwa i Geodezji Ministerstwa Rozwoju i Technologii za promotorstwo pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr inż. Anny Dominiki Kaczmarczyk nt. „Projekt konstrukcji stalowej Muzeum Sztuki Nowoczesnej”, wyróżnionej w konkursie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii na najlepsze prace dyplomowe, rozprawy doktorskie oraz publikacje w dziedzinach architektury i budownictwa, planowania i zagospodarowania przestrzennego oraz mieszkalnictwa (edycja 2020 r.), w kategorii prace magisterskie.
27. List gratulacyjny Dyrektora Departamentu Architektury, Budownictwa i Geodezji Ministerstwa Rozwoju i Technologii za promotorstwo pracy dyplomowej inżynierskiej p. inż. Daniela Kiszkurno nt. „Projekt konstrukcyjny stalowej wieży widokowej o wysokości ok. 24 metrów”, wyróżnionej w konkursie Ministra Rozwoju, Pracy i Technologii na najlepsze prace dyplomowe, rozprawy doktorskie oraz publikacje w dziedzinach architektury i budownictwa, planowania i zagospodarowania przestrzennego oraz mieszkalnictwa (edycja 2020 r.), w kategorii prace inżynierskie
28. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz warszawskich oddziałów Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej oraz Podkomitetu Budownictwa Podziemnego Polskiego Komitetu Geotechniki za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr. inż. Anny Dominiki Kaczmarczyk, 2021 r.

Praca p. mgr. inż. Anny Dominiki Kaczmarczyk została także wyróżniona w konkursie dla Młodych Inżynierów „BUILDER-a”, edycja 2020/2021 w zadaniu Wyzwanie Młodego Inżyniera

29. Medal Srebrny za Długoletnią Służbę, nadany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej, 2021 r.
30. Nagroda Zespołowa Stopnia II Jego Magnificencji Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2020-2021, 2022 r.
31. Nagroda Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej, Mazowieckiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa oraz warszawskich oddziałów Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej oraz Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej za promotorstwo nagrodzonej pracy dyplomowej magisterskiej p. mgr. inż. Filipa Jerzego Arnolda, 2025 r.

.....  
(podpis wnioskodawcy)

|                                                                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Rada Doskonałości Naukowej<br>00-901 Warszawa, pl. Defilad 1<br><b>Dział Kancelaryjny</b><br><b>WPŁYNĘŁO (RPW)</b> |      |
| 10. 12. 2025                                                                                                       |      |
| Zaopiniowano                                                                                                       |      |
| Podpis                                                                                                             | Zat. |

*DRKN. 22.400.187.2025*



Politechnika Warszawska  
Plac Politechniki 1  
00-661 Warszawa



za pośrednictwem:  
Rady Doskonałości Naukowej  
pl. Defilad 1, 00-901 Warszawa  
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

Paweł Artur Król  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej

### Sprostowanie oczywistej pomyłki w treści Autoreferatu dołączonego do Wniosku

z dnia 1 grudnia 2025 r.

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, złożonego w Dziale Kancelaryjnym Rady Doskonałości Naukowej w formie papierowej, w dniu 3 grudnia 2025 r.

Upieramnie wnoszę o sprostowanie tzw. pomyłki oczywistej w treści złożonych dokumentów.

W punkcie 4.2.3. Autoreferatu, na stronie 27, w wierszu 5 od góry błędnie podano:

„Istotę przedstawionego do oceny pierwszego osiągnięcia można zawrzeć w następujących ...”

#### Treść sprostowania:

Poprawna treść zapisu powinna mieć następującą postać:

„Istotę przedstawionego do oceny drugiego osiągnięcia można zawrzeć w następujących ...”

Z poważaniem,

*Paweł Król*