

Parametry wytrzymałościowe i mikrostrukturalne stali mostowej z końca XIX wieku

Dr inż. Paweł Kossakowski, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Betonowych, Politechnika Świętokrzyska

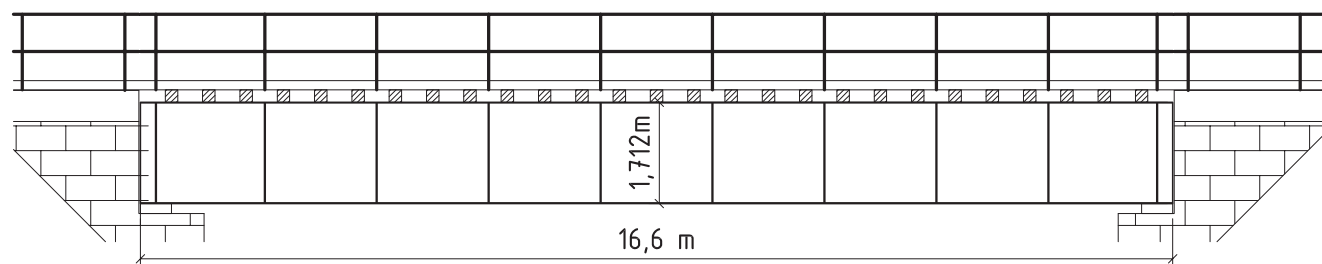
1. Wprowadzenie

Stal konstrukcyjna w porównaniu z materiałami takimi jak: drewno, kamień czy beton, które stosowano w budownictwie od zarania dziejów, jest materiałem stosunkowo młodym. Znakomite parametry wytrzymałościowe spowodowały, że stal w krótkim czasie stała się podstawowym materiałem konstrukcyjnym, z którego wykonano wiele spektakularnych i „śmiały” konstrukcji. Jednymi z konstrukcji, w których dość wcześnie na szeroką skalę zastosowano materiały metalowe, najpierw żeliwo, a później stal, były mosty. Ich budowa związana była z rewolucją przemysłową rozpoczętą w Anglii w XVIII wieku, kiedy to w efekcie uprzemysłowienia notuje się szybki rozwój traktów komunikacyjnych. Wraz z uruchomieniem w 1825 roku linii kolei publicznej łączącej Stockton z Darlington w Wielkiej Brytanii, datuje się początek rozwoju dróg żelaznych na świecie. Wraz z budową sieci kolejowych pojawiła się konieczność pokonywania rozmaitych przeszkód terenowych, co z kolei skutkowało budową mostów i wiaduktów. Pierwszym na świecie mostem z materiałów innych niż drewno i kamień był most Iron Bridge wykonany w 1779 roku z elementów z lanego żeliwa, otwarty do eksploatacji 1 stycznia 1781 r. w Ironbridge w hrabstwie Shropshire w Anglii. W dalszym okresie mosty budowano

ze stali zgrzewnej i zlewnej. Od końca XVIII wieku mosty i wiadukty żeliwne, a później stalowe, powstawały również na terenie dzisiejszej Polski, i wiele obiektów z tego okresu istnieje do dziś.

Jak nietrudno policzyć, okres eksploatacji obiektów wybudowanych w XIX wieku wynosi obecnie ponad 100 lat i wiele z nich jest wciąż użytkowanych. Powszechnie wiadomym jest fakt, że właściwości materiałowe obiektów eksploatowanych przez długi czas wykazują zmiany na skutek efektu tzw. starzenia. Może zatem zachodzić podejrzenie, że w przypadku wielu obiektów, ich nośność jest zredukowana, a może nawet niewystarczająca do bezpiecznego użytkowania. Stąd konieczność badania wytrzymałości różnych stali konstrukcyjnych stosowanych w Polsce od początku XIX wieku, jak również weryfikowania nośności mostów wybudowanych w tym okresie na podstawie rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych materiałów, z których je wykonano. Należy zauważyć, że prace takie podejmowane są w kraju przez wielu autorów [np. 1–3].

W niniejszym artykule podjęto tematykę dotyczącą wytrzymałości oraz parametrów mikrostrukturalnych stali zastosowanej do budowy mostu o ponadstuletnim okresie eksploatacji. Uzyskane w pracy wyniki mogą znaleźć zastosowanie w analizach nośności elementów konstrukcyjnych obiektów wykonanych ze stali o zbliżonym wieku oraz strukturze.



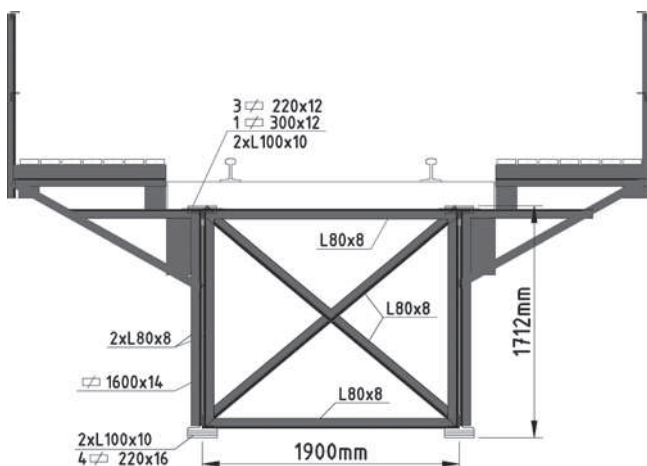
Rys. 1. Widok mostu kolejowego wybudowanego pod koniec XIX wieku

2. Konstrukcja mostu kolejowego wybudowanego pod koniec XIX wieku

Stal będąca przedmiotem badań została pobrana z elementów konstrukcyjnych mostu kolejowego funkcjonującego na trasie Radom – Tomaszów Mazowiecki. Most wybudowano w roku 1885 i był on użytkowany do roku 2007, tym samym okres jego eksploatacji wynosił około 122 lata. Z uwagi na znaczną korozję konstrukcji mostu, zarządca podjął decyzję o jego demontażu i wybudowaniu nowego obiektu.

Most zaprojektowany i wykonany został w układzie dwóch jednoprzęsłowych stalowych dźwigarów nośnych nitowanych z blach, o przekroju dwuteowym. Całkowita długość przęsła mostu wynosiła 16,6 m, a wysokość w środku rozpiętości 1,712 m (rys. 1).

Przekrój dwuteowych dźwigarów nośnych składał się ze środka wykonanego z blachy 1600 x 14 mm oraz pasów z obustronnych kątowników L100 x 10 połączonych z blachami 220 x 12 + 300 x 12 i 220 x 16, odpowiednio na górze i dole. Pasy składały się z jednej blachy w strefie przypodporowej i 4 blach w strefie środkowej. Dźwigary stężone były za pomocą poprzecznic z kątowników L 80 x 8 w kształcie litery X. Przekrój poprzeczny konstrukcji mostu w środku rozpiętości pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny mostu wybudowanego pod koniec XIX wieku (środek rozpiętości)

3. Parametry wytrzymałościowe badanej stali mostowej z końca XIX wieku

Badania stali mostowej przeprowadzono w ramach projektu badawczego [4]. Materiał pobrano z blach dźwigarów mostu, którego przekrój pokazano na rysunku 2.

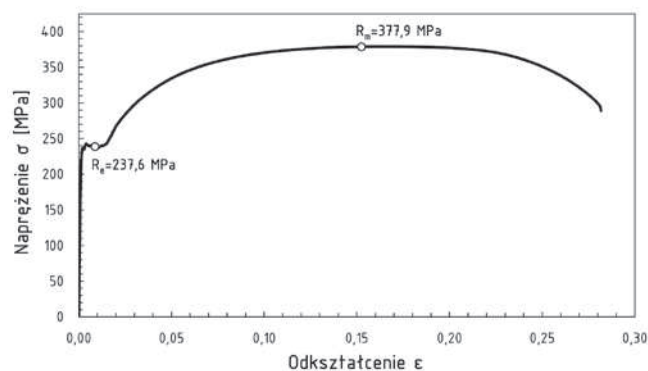
Przeprowadzono próbę statycznego rozciągania przy kontrolowanym przyroście przemieszczenia, wg [5]. Wyznaczono podstawowe parametry wytrzymałościowe stali mostowej: granicę plastyczności R_e , wytrzymałość na rozciąganie R_m oraz całkowite procentowe wy-

dłużenie przy zerwaniu A_t . Określono również stosunek granicy plastyczności do wytrzymałości na rozciąganie R_e/R_m będący dodatkowym parametrem charakteryzującym badany materiał pod względem wytrzymałościowym. Wielkości te wyznaczono dla liczebności próbek $n = 7$ dla każdego z kierunków, wzdłuż i w poprzek walcowania. Z uwagi na możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych wyników w obliczeniach inżynierskich oraz niewielkie rozrzuty wyznaczonych parametrów wytrzymałościowych dla wszystkich badanych próbek, wyznaczono ich wartości średnie łącznie dla obu kierunków, wzdłuż i w poprzek walcowania, przy założonym poziomie ufności 95%. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry wytrzymałościowe badanej stali mostowej z końca XIX wieku

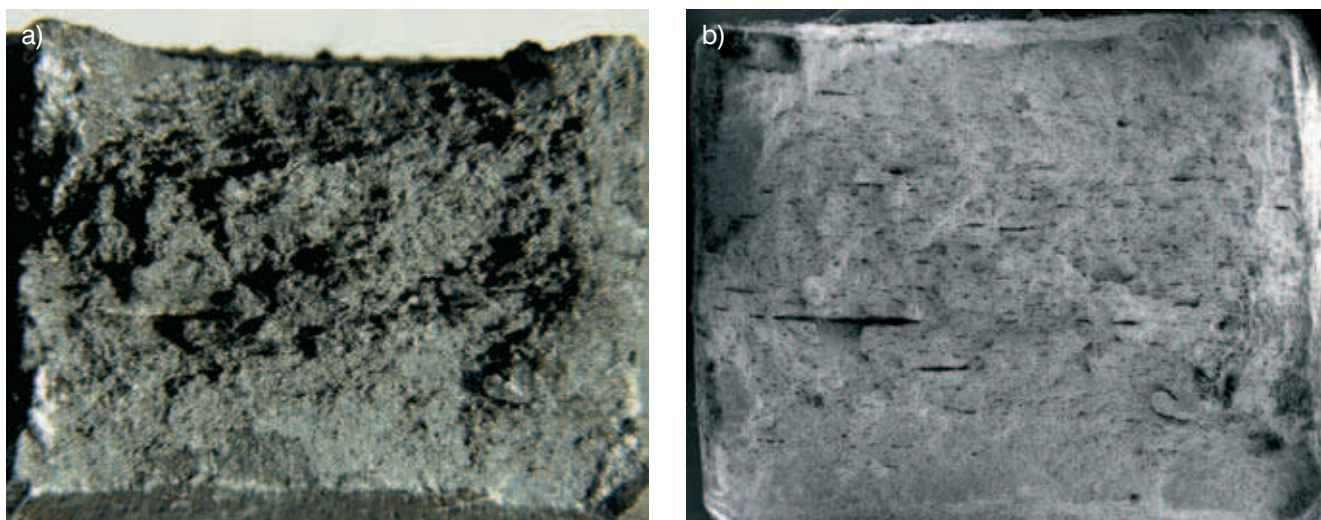
Parametr	Granica plastyczności R_e [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	R_e/R_m	Całkowite procentowe wydłużenie przy zerwaniu A_t [%]
Wartość średnia	237,6 ± 2,22	377,9 ± 6,55	1,59 ± 0,03	27,67 ± 1,89
Odchylenie standardowe	4,24	12,51	0,06	2,36

Na rysunku 3 pokazano uśredniony wykres rozciągania badanej stali mostowej z końca XIX wieku.



Rys. 3. Wykres rozciągania badanej stali mostowej z końca XIX wieku

Jak widać, średnia granica plastyczności wyznaczona dla badanej stali na poziomie $R_e = 237,6$ MPa klasyfikuje ją w grupie stali o niskiej wytrzymałości. Dla porównania, charakterystyczna granica plastyczności stali S235JR wyznaczana w trakcie prób statycznego rozciągania, kształtuje się na średnim poziomie $R_e = 320$ MPa, a zatem wytrzymałość badanej stali mostowej odpowiada jej w około 75%. Analogiczna relacja zachodzi pomiędzy granicami plastyczności stali S185 oraz S235JR, dlatego też w tym zakresie badana stal mostowa jest porównywalna z gatunkiem S185.



Rys. 4. Powierzchnia przełomu badanej stali mostowej z końca XIX wieku: a) makrofotografia, b) fotografia skaningowa

4. Parametry mikrostrukturalne badanej stali mostowej z końca XIX wieku

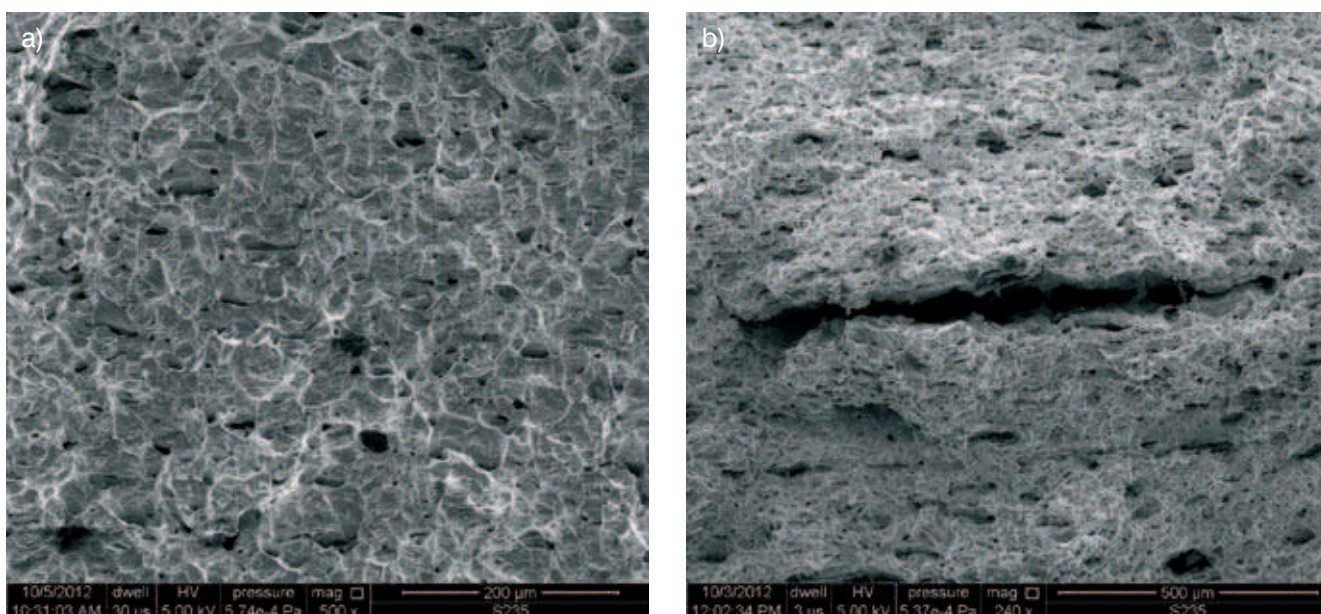
Kolejny etap prac obejmował badania mikrostruktury stali mostowej. Analizie poddano przełomy próbek, które uległy rozdzieleniu w wyniku przeprowadzonej próby statycznego rozciągania. W celu wyznaczenia podstawowych parametrów stereologicznych wtrąceń niemetalicznych, wykonano również analizę mikrostrukturalną powierzchni zgładów.

Analiza w skali makro ujawniła występowanie przełomów poprzedzonych obszarami silnie odkształconymi plastycznie o znacznym zasięgu, porównywalnym z wymiarami przekroju poprzecznego próbek. Przełomy charakteryzowały się szorstką, niejednorodną strukturą, w której można było zaobserwować wyraźnie

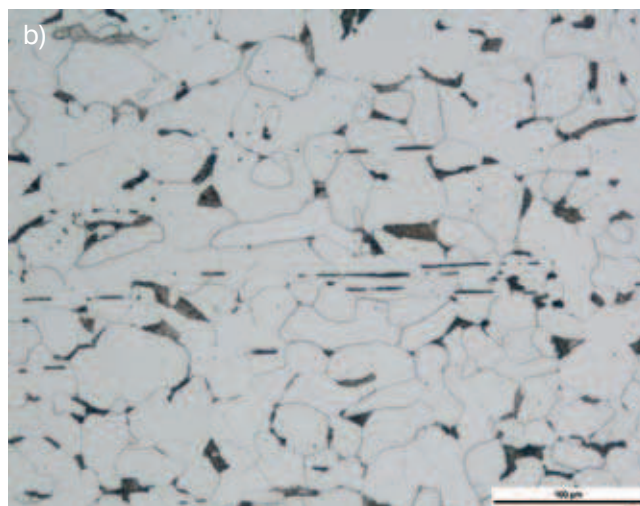
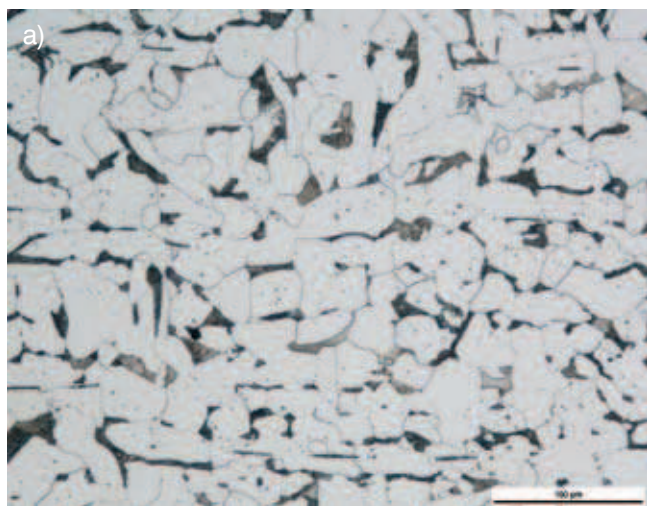
uziarnienie materiału (rys. 4 a). Uwzględniając powyższe obserwacje, przełomy badanej stali zakwalifikowano jako rozdzielcze.

Powierzchnie przełomów powstałych na rozdzielonych częściach próbek nie były identyczne. W jednej części płaszczyzny zewnętrzne przełomy w obrębie naroży przekroju poprzecznego zorientowane były pod kątem $30 \div 45^\circ$ w stosunku do osi próbek. Obszary te tworzyły niejako „koronę” wokół części środkowej, która nie stanowiła jednej płaszczyzny i składała się z obszarów wgłębień i wypukleń. Powierzchnie przełomów pozostałych części próbek stanowiły niejako „negatyw” opisanych obszarów.

Charakterystyczne było również występowanie wyraźnych rozwarstwień, występujących na całej szerokość próbek w kierunku prostopadłym do grubości blach (rys. 4 b),



Rys. 5. Fotografie skaningowe przełomów badanej stali mostowej z końca XIX wieku: a) widoczne ciemne zagłębienia (pustki) wokół wtrąceń niemetalicznych, b) szczelina powstała w miejscu występującego pasma wtrąceń niemetalicznych



Rys. 6. Mikrostruktura badanej stali mostowej z końca XIX wieku (zglądy poddane trawieniu, przekrój poprzeczny): a) warstwa środkowa, b) warstwa powierzchniowa [6]

które przebiegały od powierzchni przetomów na głębokość kilku milimetrów. Uwzględniając lameralną strukturę i rozdzielczy charakter przetomów, a także wyznaczone parametry wytrzymałościowe i wiek materiału, można stwierdzić z dużą pewnością, że badana stal odpowiada stali zgrzewnej, która była powszechnie stosowana w mostownictwie w Polsce pod koniec XIX wieku.

Mikrostruktura przetomów ujawniła występowanie dużej liczby zagłębień wokół wtrąceń niemetalicznych (rys. 5 a) świadczących o oddzielaniu się cząstek obcej fazy (wtrąceń) od osnowy materiału. Wtrącenia te układały się czasami w pasma, tworząc wydłużone szczeliny, widoczne na rysunku 5 b. Obserwowany proces pęknięcia ciągłego związany był z zarodkowaniem pustek na wtrąceniach oraz ich wzrostem i łączeniem się w trakcie odkształcania, co finalnie doprowadziło do dekohezji materiału w momencie zniszczenia.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania mikrostruktury na zglądach, wykorzystując i analizując również wyniki uzyskane w ramach pracy [6].

Badana stal cechowała się budową ferrytyczno-perlityczną. Charakterystyczny był nierównomierny rozkład perlitu na powierzchni badanych próbek oraz jego wyższa zawartość w warstwach środkowych, w porównaniu z obszarami przypowierzchniowymi, co widać wyraźnie na rysunku 6.

Analiza mikrostrukturalna [6] wykazała występowanie dużej liczby wtrąceń niemetalicznych, głównie siarczków i tlenków, co obserwowano również na powierzchniach przetomów. Wtrącenia typu siarczkowego charakteryzowały się wydłużonym kształtem o maksymalnej długości



Rys 7. Mikrostruktura badanej stali mostowej z końca XIX wieku (zgląd podany polerowaniu) [6]

112,4 μm . Występowały one nieregularnie w strukturze materiału i układały się w opisane już wcześniej pasma, o maksymalnej długości przekraczającej 700 μm , pokazane na rysunku 7. Wtrącenia tlenkowe występowały czasami razem z wtrąceniami siarczkowymi i cechowały się kształtem zbliżonym do prostopadłościennego.

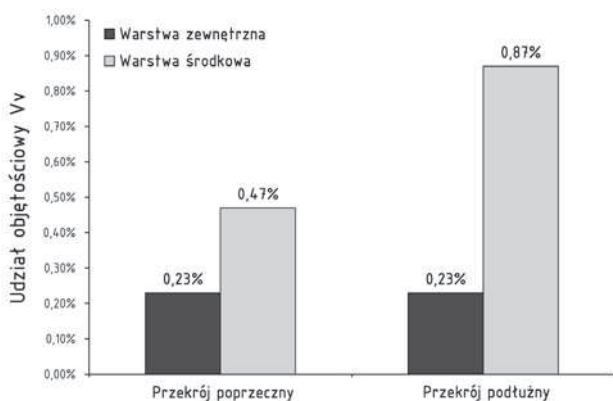
W zakresie analizy mikrostrukturalnej wyznaczono podstawowe parametry stereologicznych wtrąceń niemetalicznych: udział objętościowy V_v , pole powierzchni przekroju A , średnicę równoważną d_2 , średnicę maksymalną d_{max} , średnicę minimalną d_{min} oraz średnicę największego wydzielenia D_{max} . Parametry te zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry stereologiczne badanej stali mostowej z końca XIX wieku [6]

Przekrój	Warstwa	V_v [%]	A [μm^2]	d_2 [μm]	d_{min} [μm]	d_{max} [μm]	D_{max} [μm]
Poprzeczny	zewnątrzna	0,23	7,3	2,6	1,5	5,4	49,1
	środkowa	0,47	7,8	1,9	1,4	3,2	110,6
Podłużny	zewnątrzna	0,23	3,4	1,9	1,4	2,9	17,4
	środkowa	0,87	8,3	2,1	1,5	3,4	112,4

Szczególnie interesujące są parametry stereologiczne dotyczące udziału objętościowego wtrąceń niemetalicznych V_v , z uwagi na fakt, że porowatość początkowa badanego materiału jest bezpośrednio związana z rozwojem mikrodefektów, które odpowiadają za inicjację mikropęknięcia, powodującą obniżenie wytrzymałości, a w efekcie zniszczenie materiału.

Analizując uzyskane wyniki należy zauważyć wysoki udział objętościowy wtrąceń niemetalicznych, wahający się w granicach od 0,23 do 0,87%. Najniższa zawartość wtrąceń 0,23% występowała w warstwach zewnętrznych badanych próbek zarówno w kierunku poprzecznym, jak i podłużnym do kierunku walcowania. Wyniki te można wytłumaczyć procesem technologicznym – walcowaniem, które powoduje, że pory istniejące w warstwach zewnętrznych są niejako wgniatane do środka materiału. Wyższa zawartość wtrąceń niemetalicznych stwierdzona została w warstwach środkowych próbek dla obu kierunków. Maksymalny udział objętościowy wtrąceń 0,87% stwierdzono w warstwie środkowej w kierunku wzdłuż walcowania. Rozkład udziałów objętościowych V_v wtrąceń niemetalicznych dla poszczególnych warstw i kierunków pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Rozkład udziału objętościowego wtrąceń niemetalicznych V_v badanej stali mostowej z końca XIX wieku

Określone parametry mikrostrukturalne, a przede wszystkim udział objętościowy wtrąceń niemetalicznych, mogą być wykorzystane w analizach wytrzymałościowych opartych na mechanice zniszczenia. Na uwagę zasługuje tutaj model materiałowy Gursona-Tvergaarda-Needlemana, który może być nader użyteczny w analizach nośności elementów oraz symulacji zniszczenia stali konstrukcyjnych, której przykład podano w pracy [7].

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wytrzymałości i parametrów mikrostrukturalnych stali pobranej z mostu kolejowego, który był eksploatowa-

ny na terenie naszego kraju od końca XIX wieku do początku XXI wieku.

Wyznaczone parametry wytrzymałościowe badanej stali mostowej, a przede wszystkim charakterystyczna granica plastyczności $R_p = 237,6$ MPa, klasyfikuje ją w grupie stali niskowytrzymałych, porównywalnych np. z gatunkiem S185. Jednocześnie stwierdzono relatywnie wysoką ciągliwość badanej stali na poziomie około 28%, co w sytuacji wystąpienia stanu awaryjnego konstrukcji wykonanej z tego typu stali zapewnia pewien zapas nośności w zakresie pokrytycznym.

Mikrostruktura badanej stali charakteryzuje się wysoką zawartością wtrąceń niemetalicznych, głównie siarczków i tlenków o wysokim maksymalnym udziale objętościowym 0,87%. Wielkość ta może być przyjmowana w analizach nośności elementów konstrukcyjnych wykonanych ze stali o zbliżonych parametrach, przy zastosowaniu metod opartych na mechanice zniszczenia, które umożliwiają symulowanie zniszczenia materiału z uwzględnieniem wpływu defektów mikrostrukturalnych na jego wytrzymałość.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Biliszczuk J., Rabięga J., Badania materiału pierwszego na kontynencie europejskim mostu żelaznego. Inżynieria i Budownictwo, Nr 6, 308–309, 1997
- [2] Konat Ł., Pękalski G., Rabięga J., Sachadel U., Material tests of a bridge from 1796 over the Strzegomka River in Łążany, Lower Silesia. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 5, No. 4, 27–41, 2005
- [3] Lesiuk G., Szata M., Degradacja mikrostruktur elementów konstrukcyjnych pochodzących z mostów wzniesionych na przełomie XIX i XX wieku. Zeszyty Naukowe WSOWL, Nr 1 (155), Wrocław 2010
- [4] Trąmpczyński W. i inni, Projekt Badawczy Nr R 04 007 01 „Opracowanie oraz wstępna weryfikacja procedury diagnozowania metodą emisji akustycznej konstrukcji metalowych ze szczególnym uwzględnieniem mostów stalowych”. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2010
- [5] PN-EN 10002-1:2004 Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia
- [6] Raport Badawczy „Określenie struktury materiałów (pobrane z konstrukcji) analiza porównawcza z parametrami stali wzorcowej” wykonany w ramach Projektu Badawczego Nr R 04 007 01 „Opracowanie oraz wstępna weryfikacja procedury diagnozowania metodą emisji akustycznej konstrukcji metalowych ze szczególnym uwzględnieniem mostów stalowych”. Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Warszawa 2008
- [7] Kossakowski P., Symulacja plastycznego zakresu pracy stali konstrukcyjnych w złożonym stanie naprężeń w oparciu o model Gursona-Tvergaarda-Needlemana, Przegląd Budowlany, Nr 3, 43–49, 2012