

PRZEMYSŁAW GRABIAS

mgr inż. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, email: pgrabias@agh.edu.pl

Wybrane techniki pomiarowe w badaniach stanu technicznego tras i pętli tramwajowych^{1,2}

Streszczenie: W obecnych czasach zapewnienie efektywnego i wydajnego funkcjonowania komunikacji miejskiej należy do priorytetowych zadań władz miasta. Liczne inwestycje obejmują zarówno budowę nowych tras i pętli tramwajowych, jak i zakup nowoczesnego taboru. Istotnym zadaniem jest ich utrzymanie w ciągłej sprawności, długiej żywotności i w dobrym stanie technicznym. By to zapewnić, warto zadbać o pozyskanie aktualnych danych o infrastrukturze tramwajowej. Regularne badania torowisk, a w szczególności sprawdzenie stanu technicznego ich nawierzchni stalowej są jednym z kluczowych aspektów zapewniających bezpieczeństwo prowadzenia ruchu. W pracach tych wykorzystywane są techniki geodezyjne, diagnostyczne i inżynierskie. Część z nich to sprawdzone rozwiązania kolejowe, zaadaptowane dla potrzeb tramwajowych i dostosowane do ich charakterystyki. W artykule przybliżono technologie prowadzenia badań technicznych wraz z konkretnymi przykładami wykorzystywanego sprzętu. Do wspomnianych technik należą: pomiar tachymetryczny osi i niwelety toru wykorzystujący specjalną belkę do torów tramwajowych, sprawdzenie parametrów geometrycznych toru z użyciem toromierza elektronicznego, wykonanie przekrojów poprzecznych szyn za pomocą profilomierza oraz pomiar twardości szyn. Znajomość różnorodnych rozwiązań pomiarowych i dostęp do nowoczesnego sprzętu umożliwia pozyskanie wielu cennych informacji o stanie nawierzchni stalowej toru. Dane te pozwalają na wykonanie szczegółowych analiz, często z użyciem specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Dokonano także analizy przepisów dotyczących torowisk tramwajowych, a najistotniejsze z nich zostały przybliżone w artykule. Posiadanie obszernej znajomości przepisów i wiedzy o technologiach pomiarowych może znacznie uprościć prowadzenie prac związanych z utrzymaniem infrastruktury miejskiej komunikacji szynowej.

Słowa kluczowe: komunikacja tramwajowa, techniki pomiarowe, tory tramwajowe, geometria toru.

Wprowadzenie

Wiele miast dokłada starań, by transport zbiorowy stał się coraz atrakcyjniejszą i popularną alternatywą dla samochodów. W warunkach miejskich najbardziej efektywnym środkiem komunikacji jest transport szynowy. Jednocześnie wymagania i oczekiwania stawiane przed nim stale się zwiększają. Istniejące obecnie systemy tramwajowe zazwyczaj wymagają rozbudowy i modernizacji. Aktualnie podejmuje się realizację rozwiązań z zakresu nowoczesnych typów miejskiej komunikacji szynowej, takich jak szybki tramwaj i metro. Przykładami takich inwestycji są szybkie tramwaje w Krakowie, Poznaniu i Szczecinie oraz warszawskie metro. Przeszkodą w budowie szybkiego tramwaju lub metra mogą być uwarunkowania terenowe, środowiskowe

lub brak wystarczających środków finansowych. W takich przypadkach podstawę miejskiej sieci transportu szynowego stanowi tramwaj klasyczny. Warto przy tym pamiętać, że infrastruktura tramwajowa wymaga kompleksowego utrzymania, przeprowadzania modernizacji istniejących odcinków oraz podejmowania nowych inwestycji.

Dla przykładu, podstawę transportu zbiorowego Krakowa stanowi sieć tramwajowa, stanowiąca układ bazowy komunikacji miejskiej. Obsługuje ona większość tras łączących centrum z zewnętrznymi dzielnicami. W rejonach obrzeży miasta i na nowych osiedlach uzupełnia ją komunikacja autobusowa. Do 2030 roku w Krakowie planowana jest budowa kilku nowych tras i pętli tramwajowych. W najbliższej przyszłości realizowana będzie inwestycja stanowiąca połączenie między pętlą na Kurdwanowie a ulicą Zakopiańską. Linia ta przebiegać będzie w tunelu pod terenami sanktuarium w Łagiewnikach. Z kolei w północnej części Krakowa planowane jest zbudowanie odcinków w kierunku północnym od pętli Krowodrza Górka (w kierunku okolic Górki Narodowej) oraz zachodnim (w kierunku ronda Ofiar Katynia i Galerii Bronowice). Obecnie prowadzona jest również kompleksowa modernizacja torowiska do Bronowic w ciągu ulic Królewskiej, Podchorążych i Bronowickiej. Inwestycje w zakresie usprawnienia infrastruktury tramwajowej uwzględniane są także w ramach Budżetu Obywatelskiego. Jednym z przyjętych w 2017 roku zadań jest fizyczne wydzielenie torowisk tramwajowych od pasów samochodowych poprzez montaż separatorów drogowych. W długoterminowej perspektywie rozwiązanie to ma ograniczyć tworzenie się zatorów tramwajowych i samochodowych, co w konsekwencji ma zapewnić sprawniejszy przejazd komunikacji miejskiej i służb ratowniczych.

Zarówno istniejące, jak i planowane trasy oraz pętle tramwajowe będą wymagać kontrolowania ich stanu technicznego. Badania takie prowadzone są często z wykorzystaniem metod stosowanych na drogach kolejowych. Tory tramwajowe posiadają jednak odmienną charakterystykę, warunki i przepisy. Niektóre z tych technik wymagają dostosowania do warunków tramwajowych. W odróżnieniu od dróg kolejowych, trasy tramwajowe w zasadzie nie posiadają uporządkowanego zbioru przepisów, odpowiadających wytycznym i instrukcjom kolejowym. W użyciu są natomiast dokumenty o różnej formie, randze i zakresie tematycznym. Obejmują one akty prawne, wytyczne techniczne, Polskie Normy oraz istniejącą literaturę. W przypadku braku rozwiązań pomiarowych, możliwe jest korzystanie z praktyki kolejowej. Techniki te powinny stosować się z uwzględnieniem różnic między trasami kolejowymi i tramwajowymi.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2019.

² Praca została wykonana w ramach grantu dziekańskiego AGH nr 15.11.150.518

W artykule przybliżono charakterystykę pomiarów osi i niwelety toru, badań geometrii toru z użyciem toromierza elektronicznego oraz kontroli profilu poprzecznego i twardości szyn. Badania te mogą być prowadzone z wykorzystaniem różnego rodzaju urządzeń i przyrządów pomiarowych.

Przepisy w zakresie torowisk tramwajowych

Tor tramwajowy można zdefiniować jako zespół dwóch równoległych toków szynowych, stanowiących łącznie z innymi elementami konstrukcję przystosowaną do kierowania kołami taboru i przenoszenia obciążeń tego taboru [1]. Składa się on z nawierzchni stalowej (szyn i rozjazdów), podbudowy, podłoża oraz urządzeń odwadniających. Szyny kierują bieg wagonów w wyznaczonym przez nie kierunku, a także przejmują i przekazują obciążenia od kół wagonów. Powinny być one wytrzymałe i dobrze przewodzić prąd. W zależności od warunków stosowane są zarówno szyny rowkowe (tramwajowe), jak i szyny Vignole'a (kolejowe) [2]. Na prostych i w łukach poziomych o promieniu powyżej 150 m (z wyjątkiem szyn łączących w łukach rozjazdów) w przypadku szyn rowkowych korzysta się zazwyczaj szyn o profilu 60R2 ze stali R260. Natomiast w łukach poziomych o promieniach poniżej 50 m stosuje się zwykle szyny o profilu 59R2 ze stali R290GHT [3]. Szyny Vignole'a na podkładach wykorzystuje się najczęściej na prostych i w łukach poziomych o promieniu większym niż 150 m i w obrębie tzw. torowisk zielonych. Torowiska tramwajowe traktowane są jako element pasa drogowego. Podzielić je można ze względu na położenie na: wydzielone (odizolowane od ruchu pojazdów samochodowych) i niewydzielone (przebiegające wraz z innymi trasami komunikacyjnymi [4]. Wymagania dotyczące projektowania torowisk określają *Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych z 1983 r.* [5] oraz *Tymczasowe wytyczne do projektowania szybkiej komunikacji tramwajowej z 1981 r.* [6].

Utrzymanie torów tramwajowych w stałej sprawności eksploatacyjnej wymaga ciągłych prac konserwacyjnych. Składają się na nie: konserwacja i naprawy torów, oczyszczenia (stałe i sezonowe) oraz konserwacja urządzeń przytorowych [7]. Konserwacja obejmuje kontrolę stanu technicznego (m.in. stopień zużycia szyn i ich ewentualne uszkodzenia), prace zabezpieczające przed nadmiernym zużyciem, usuwanie uszkodzeń i zagrożeń o charakterze awaryjnym oraz utrzymywanie czystości torowisk. Naprawy torów można podzielić na bieżące, średnie i główne (kapitałne remonty torów). Oczyszczenia stałe dotyczą czyszczenia szyn i torowiska, natomiast sezonowe obejmują odśnieżanie i minimalizowanie negatywnych skutków warunków pogodowych. Konserwacja urządzeń przytorowych dotyczy m.in. przystanków i wysepek przystankowych. Czynności wykonywane podczas badań technicznych i oględzin torów tramwajowych określa norma PN-K-92011:1998 *Torowiska tramwajowe – Wymagania i badania* [1]. Podaje ona również zalecane technologie badań i ich sposób wykonywania oraz wymagania i dopuszczalne tolerancje dla otrzymanych wyników. Badania eksploatacyjne nawierzchni stalowej torowisk tramwajowych prowadzone

w pełnym zakresie powinny obejmować sprawdzenie osi trasy i niwelety w punktach charakterystycznych, nawierzchni stalowej oraz rozjazdów. Dodatkowo sprawdzone powinny zostać podtorze, podbudowa i odwodnienie toru. Prace te mają na celu określenie przydatności tych obiektów w danych warunkach ruchu oraz ich trwałości użytkowej.

Szerokość toru określa się jako odległość między krawędziami tocznymi szyn, mierzona prostopadłe do osi toru tramwajowego w ustalonej i zależnej od typu szyny wysokości poniżej jej górnej powierzchni tocznej, w miejscu gdzie nie występuje krzywizna główki [1]. Wytyczne [5,6] określają maksymalną odchyłkę szerokości toru tramwajowego na prostej i łukach o promieniu nie mniejszym niż 100 m na +10 mm, a dla łuków o promieniu poniżej 100 m na +15 mm. Należy podkreślić, że w przypadku torów tramwajowych nie dopuszcza się zawężenia szerokości toru na łuku. Według jej wskazań normy [1] odchyłki szerokości toru nie powinny być większe niż:

- ± 2 mm na prostej, przy czym odległość miejsca największego zwężenia toru do miejsca największego poszerzenia toru nie powinna być mniejsza niż 6 m;
- ± 4 mm na łuku, przy czym odchyłki na końcu łuku powinny być równe zero, a największa odchyłka szerokości toru może wystąpić na wierzchołku łuku.

Przechyłka jest różnicą wysokości toków szynowych w jednym przekroju poprzecznym. Stosowana jest na łukach kołowych poprzez podniesienie szyny zewnętrznej względem wewnętrznej. Zależy ona od promienia łuku i szybkości jazdy. Wartość przechyłki maksymalnej toru zależy od typu torowiska, jego rodzaju oraz rozstawu. Na łukach kołowych przechyłka jest stała, natomiast na krzywej przejściowej zwiększa się w miarę przechodzenia w łuk kołowy. Przechyłkę normalną toru tramwajowego o szerokości 1435 mm oblicza się według wzoru (1):

$$h = \frac{8 \cdot V^2}{R} \quad (1)$$

gdzie:

- h – przechyłka toru [mm],
- V – szybkość jazdy [km/h],
- R – promień łuku [m].

W uzasadnionych przypadkach, gdy nie jest możliwe zrealizowanie przechyłki normalnej, stosowana jest wartość odpowiednio pomniejszona, nazywana przechyłką minimalną. Dotyczy to m.in. torowisk niewydzielonych. Dopuszczalna różnica poziomu obu szyn na prostej wynosi 30 mm, natomiast odchylenie w stosunku do wymaganej przechyłki może wynosić maksymalnie 5% [1].

Techniki pomiarowe w badaniach tras i pętli tramwajowych

Pomiar osi toru i niwelety

Umiejscowienie toru w przestrzeni określa jego oś oraz niweleta. Oś toru opisuje jego położenie sytuacyjne, natomiast niweleta daje informacje o położeniu wysokościowym.

Zarówno oś toru, jak i niweleta jest mierzona w określonych miejscach, tzw. punktach charakterystycznych toru. Kontrola ich położenia wykonywana może być także w dodatkowych punktach, położonych w określonych odstępach od siebie. Współrzędne punktów określane są w układzie lokalnym lub w nawiązaniu do układu państwowego. Pomiar osi toru i niwelety wykonywane są zazwyczaj w sposób zintegrowany za pomocą tachymetru elektronicznego z wykorzystaniem metody biegunowej 3D. Odbywa się on do reflektorów pryzmatycznych zainstalowanych na belce pomiarowej. Przykładem zestawu do takiego pomiaru jest precyzyjny tachymetr elektroniczny Leica Nova MS50, współpracujący z belką pomiarową firmy Goecke Schwelm (rys. 1). Dokładność pomiaru kąta wspomnianego tachymetru wynosi 3 cc (1''), natomiast odległość jest mierzona z dokładnością 1 mm + 1,5 ppm. Belka pomiarowa pozwala na zamocowanie pryzmatu na trzpieniu umiejscowionym dokładnie nad osią toru. Konstrukcja belki dostosowana jest do charakterystyki toru tramwajowego i dla bezpieczeństwa izolowana od szyn na obu jej końcach.



Rys. 1. Tachymetr Leica Nova MS50 (a) oraz belka pomiarowa Goecke Schwelm (b)
Źródło: opracowanie własne

W czasie prac terenowych jako osnowa geodezyjna wykorzystywane są istniejące lub specjalnie założone na potrzeby pomiarów punkty. Mogą stanowić one zarówno stanowiska tachymetru, jak i punkty nawiązania. Wynikiem wyrównania obserwacji pozyskanych w czasie pomiarów są współrzędne punktów reprezentujących mierzony tor. Stanowią one punkt wyjścia dla późniejszych prac. Jednym z nich jest projekt regulacji, który pozwala zweryfikować i poprawić geometrię toru. Przekłada się to na zwiększenie parametrów eksploatacyjnych, skrócenie czasu przejazdu i zwiększenie bezpieczeństwa [8]. Projekt wykonywany jest zwykle w ramach modernizacji drogi szynowej, towarzysząc pozostałym pracom torowym. Regulacja osi toru wykonywana jest według ustalonych kryteriów i założeń. Może ona mieć na celu przywrócenie geometrii do stanu określonego w projekcie technicznym lub alternatywnie obejmować przeprojektowanie i dopasowanie układu geometrycznego toru do najkorzystniejszego w danych warunkach wariantu. Projekt regulacji osi toru opracowywany jest zazwyczaj w specjalistycznym oprogramowaniu. Jedną z popularniejszych metod wpasowania geometrii w zbiór punktów z pomiaru jest wieloelementowa analiza regresji. Efektem wykonanego projektu regulacji jest raport z prezentacjami w stosunku do obecnej osi toru. Nowa oś toru wyznaczana jest w terenie na podstawie miar od znaków geodezyjnej osnowy specjalnej.

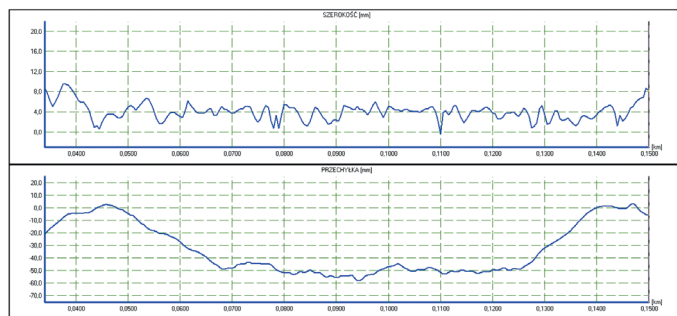
Pomiar geometrii toru

Pomiar szerokości i przechyłki toru według normy [1] powinien być wykonywany toromierzami ręcznymi na torze prostym co 10 m, na łukach 5 m i w rozjazdach co 2 m. Istnieją jednak technologie zapewniające porównywalną dokładność i spełniające założone wymagania, umożliwiając jednocześnie wydajniejszy i wygodniejszy pomiar. Przykładem takiego rozwiązania jest toromierz samorejestrujący, potocznie nazywany wózkiem pomiarowym. Przyrząd ten jest powszechnie stosowany na liniach kolejowych. Adaptacja toromierza do pomiarów na trasach tramwajowych wymaga dopasowania konstrukcji do panujących tam warunków. Do różnic w stosunku do kolei zalicza się możliwość zintegrowania torowiska z nawierzchnią drogową oraz zastosowanie szyn rowkowych lub blokowych. Dodatkowym utrudnieniem są małe promienie łuków kołowych, występujące zwłaszcza na pętlach tramwajowych, sięgające w skrajnych przypadkach 20 m. Przykładem samorejestrującego toromierza elektronicznego przystosowanego do zastosowań tramwajowych jest TEC-1435 N3, widoczny na rysunku 2. Instrument tego typu pozyskuje szereg danych opisujących aktualne parametry geometrii toru [9]. Ich rejestracja odbywa się w ustalonych odstępach (najczęściej co 0,5 m) na podstawie drogi (kilometrażu) mierzonej przez toromierz.



Rys. 2. Samorejestrujący toromierz elektroniczny TEC-1453 N3
Źródło: opracowanie własne

Przykładowe wykresy szerokości i przechyłki, wygenerowane na podstawie danych z toromierza, zamieszczone są na rysunku 3. W trakcie pomiaru możliwe jest także rejestrowanie napotkanych obiektów, wydarzeń lub uszkodzeń toru wraz z kilometrażem ich wystąpienia. Wyniki zapisywane są na bieżąco w pamięci wewnętrznej urządzenia. Do obsługi urządzenia wystarczająca jest jedna osoba kierująca wózek. W razie potrzeby możliwe jest zatrzymanie pracy, szybkie usunięcie toromierza z toru i jej wznowienie w dowolnym momencie. Przed pomiarem toromierz wymaga krótkiej kalibracji zgodnie z zaleceniami zawartymi w instrukcji. W przypadku posiadania fizycznie zaznaczonego w terenie kilometrażu badanego odcinka, możliwy jest niezależny pomiar parametrów geometrii toru. Traktowany może być jako pomiar kontrolny dla toromierza samorejestrującego i wykonywany na krótkich lub problematycznych odcinkach. Najprostszą opcją takiego pomiaru jest pomiar samym toro-



Rys. 3. Przykładowe wykresy wygenerowane na podstawie danych z toromierza TEC-1453 N3
Źródło: opracowanie własne

mierzem w wariancie z zatrzymywaniem się nad kolejnymi punktami pomiarowymi i manualnym odczytem parametrów w żądanym miejscu. Niezależnie od rejestracji wyników przez toromierz analogiczny możliwy jest do wykonania pomiar toromierzem ręcznym. Precyzyjne wartości przechyłki toru w ramach kontroli otrzymuje się także na podstawie pomiaru niwelacyjnego punktów na główkach lewej i prawej szyny oraz obliczenia różnicy ich wysokości.

Badania profilu poprzecznego szyny

Często występującym problemem eksploatacji torowisk tramwajowych jest zużycie boczne szyn. Zasadnicza zależność między jego stopniem a promieniem łuku jest następująca: im mniejszy promień łuku kołowego, tym większe zużycie boczne. Jest to potwierdzone wieloma badaniami i widoczne szczególnie na pętach tramwajowych [10,11]. Przyjmuje ono największe wartości w łukach o małym promieniu, poddawanych intensywnej eksploatacji. Dodatkowym obciążeniem dla szyn jest ruch taboru o często niekorzystnym wpływie na stan i zużycie toru. Od momentu opublikowania wytycznych [5,6] w charakterystyce używanego taboru zaszły istotne zmiany. Tramwaje obecnie są dłuższe (nawet do 45 m), cięższe (masa próżnego wagonu na jeden wózek dochodząca do 15 t) i szybsze (prędkość maksymalna 70–80 km/h). Często rezygnuje się też z wagonów doczepnych i korzysta z taboru wieloczołowego. Dzisiejsze tramwaje różnią się od siebie głównie rodzajem wózków (obrotowe lub nieobrotowe) oraz rodzajem osadzenia kół i geometrią kontaktu zestawów kołowych (klasyczne zestawy kołowe, koła swobodne lub oś portalowa) [12]. Boczne zużycie szyn można ograniczać poprzez ich smarowanie, przenoszenie części ruchu taboru na inne odcinki i pętle lub ograniczanie dopuszczalnej prędkości.

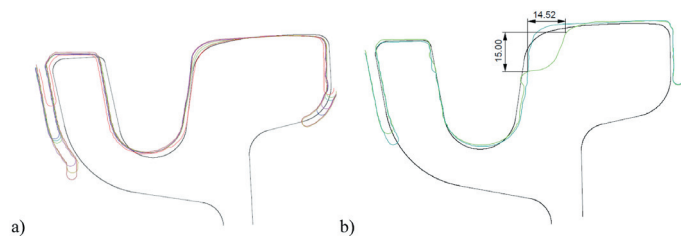
Skutecznym sposobem badania wartości, rozkładu i postępu zużycia bocznego w czasie jest pomiar profili poprzecznych szyn. Kontrola może być wykonywana w równych odstępach lub w wybranych miejscach. Pojedynczy pomiar prowadzony jest zawsze dla pojedynczej szyny. Do wykonania takich badań wykorzystany jest profilomierz XY, który zaprezentowany został na rysunku 4.

Obserwacje powinny być na bieżąco opisywane, by umożliwić łatwą identyfikację miejsca pomiaru pojedynczego przekroju szyny. Wykonane profile wczytywane są do programu umożliwiającego wyświetlanie i analizę obserwacji. Wymagają one dodatkowo dopasowania do odpowiedniego wzoru szyny. Oprogramowanie pozwala także na nałożenie na siebie i po-



Rys. 4. Profilomierz do szyn i rozjazdów XY

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Skalibrowane profile z różnych okresów pomiarowych nałożone na siebie (a) oraz profile szyny przed i po wykonaniu napawania szyn, z widocznym zużyciem bocznym (b)
Źródło: opracowanie własne

równanie tych samych miejsc, pomierzonych w różnych okresach. Przykładowe profile wykonane za pomocą profilomierza XY zostały zamieszczone na rysunku 5.

Pomiar twardości szyn tramwajowych

Twardość jest miarą odporności materiału przeciw lokalnym odkształceniom trwałym, powstałym na powierzchni badanego przedmiotu wskutek wciskania w nią drugiego twardszego ciała zwanego wgłębnikiem. Przepisy dotyczące zagadnienia pomiaru twardości szyn obejmują polskie i międzynarodowe normy [2,3,13,14] oraz warunki wykonania i odbioru szyn kolejowych [15,16]. Wykonywane są one najczęściej w oparciu o metodę i skalę twardości Leeba (HL). Oznaczenie twardości metalu w skali Leeba polega na pomiarze prędkości masy uderowej przed i po uderzeniu w próbkę przez bijak. Do pomiaru służą twardościomierze złożone z modułu elektronicznego (urządzenie wskazujące) i mechanicznej głowicy uderzeniowej (bijaka). Bijak zawiera układ napędowy ze sprężyną, masę uderzeniową oraz cewkę wewnątrz której się porusza. Przykładem twardościomierza przenośnego jest model MC-660A D (rys. 6a). Zastosowanie tego przyrządu obejmuje pomiar twardości różnych gatunków stali, żelaza oraz różnorodnych stopów metali i niemetali. Twardościomierz MC-660A D wykonuje pomiary próbki w skali twardości Leeba (HL). Zazwyczaj wynik ten przeliczany jest automatycznie w urządzeniu na bardziej reprezentatywną wartość w skali twardości Brinella (HBW). Twardość w tej skali jest stosunkiem siły P wciskającej wgłębnik do pola A trwałego odcisku, który w postaci czaszy kulistej utworzy się na powierzchni materiału, co obrazuje wzór (2):

$$HBW = 0,102 \frac{P}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (2)$$

Skala ta przyjmuje zakres od 3 do 650 jednostek. Warunki Id-106 [16] wskazują, by wyniki pomiarów twardości były przeprowadzane na linii środkowej powierzchni tocznej głów-

