



Wyznaczanie normalnych charakterystyk podatnościowych styku powierzchni o określonej strukturze geometrycznej

RAFAŁ GRZEJDA, JANUSZ CIELOSZYK

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, 70-310 Szczecin, al. Piastów 19,
rafal.grzejda@zut.edu.pl, janusz.cieloszyk@zut.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono sposób wyznaczania normalnej charakterystyki podatnościowej styku między elementami łączonymi w połączeniu wielośrubowym. Badania wykonano przy użyciu ekwiwalentnych próbek zastępujących elementy łączone. Przeprowadzono ocenę struktury geometrycznej powierzchni dla próbek i elementów łączonych. Podano zależność między normalnymi naciskami powierzchniowymi a normalnymi odkształceniami stykowymi dla badanego połączenia.

Słowa kluczowe: struktura geometryczna powierzchni, analiza wieloparametrowa, normalna charakterystyka podatnościowa, połączenie wielośrubowe

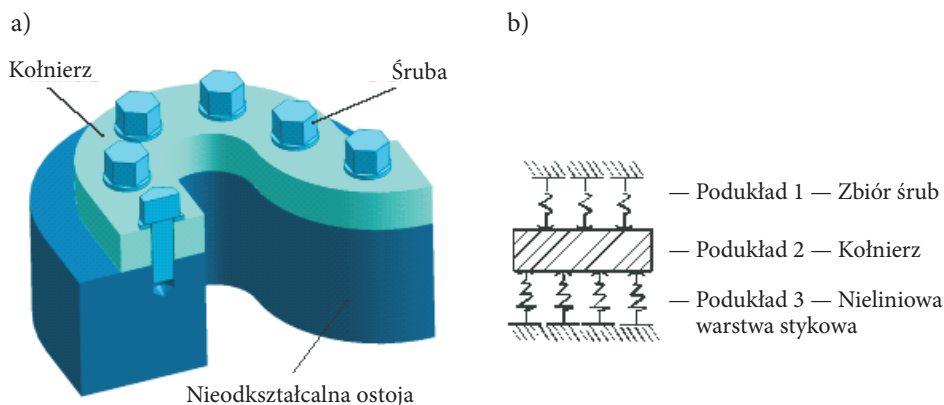
DOI: 10.5604/12345865.1116943

1. Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych elementów procesu projektowania układów mechanicznych jest wykorzystanie w obliczeniach modeli. Wiarygodność przyjętych założeń i uproszczeń modelu musi być jednak zweryfikowana doświadczalnie. Dzięki badaniom konstruktor zyskuje wiedzę na temat zasadności przyjętych w danych obliczeniach modeli (ich założeń i uproszczeń). Dotyczy to szczególnie układów wielu kontaktujących się ze sobą ciał, których przykładem są połączenia wielośrubowe.

Modelowanie połączeń wielośrubowych przedstawione w pracy [1] dotyczy połączeń odkształcalnego elementu kołnierzewego z ostoją, którą uznaje się za

nieodkształcalną (rys. 1a). Najistotniejszą cechą proponowanego sposobu modelowania jest potraktowanie tego połączenia wielorubowego jako układu złożonego z trzech podukładów. Są to: zbiór śrub mocujących, kołnierz i nieliniowa warstwa stykowa między kołnierzem a nieodkształcalną ostoją (rys. 1b). Wprowadzony podział układu wielorubowego umożliwia modelowanie każdego z jego podukładów jako odrębnego modelu. Dzięki temu można na przykład w modelu podukładu związanego z warstwą stykową uwzględnić doświadczalne charakterystyki styku między elementami łączonymi w danym rzeczywistym połączeniu.



Rys. 1. Połączenie wielorubowe: a) schemat; b) podział na podukłady

2. Cel, zakres i przedmiot badań

Badania doświadczalne strefy kontaktu między elementami łączonymi w połączeniach śrubowych prowadzono dotąd pod kątem:

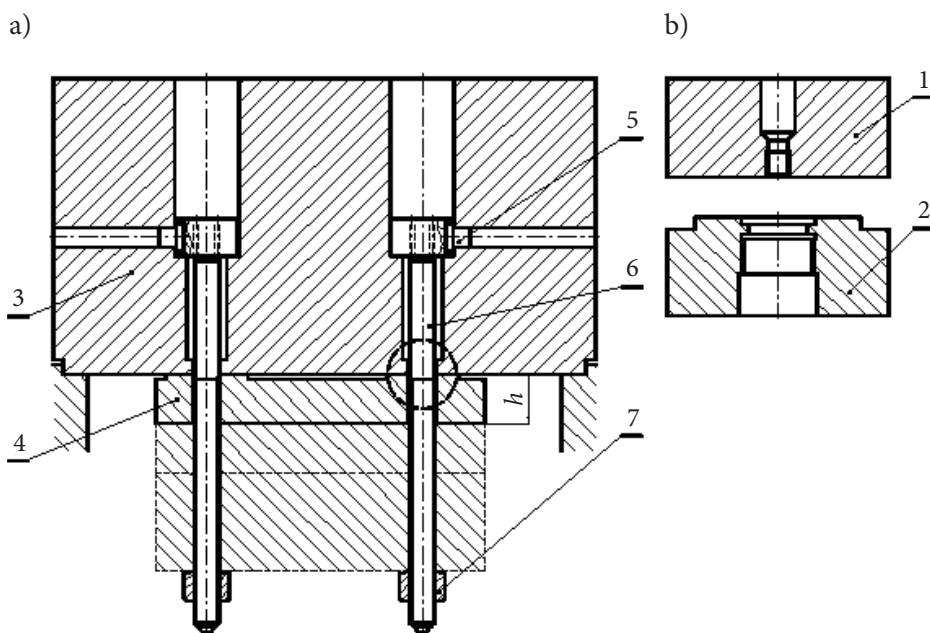
- wyznaczenia rozkładu nacisków powierzchniowych z wykorzystaniem tensometrii [2],
- określenia kształtu powierzchni kontaktu za pomocą ultrasonografii [3],
- wyznaczenia kształtu powierzchni kontaktu oraz rozkładu nacisków powierzchniowych z wykorzystaniem ultrasonografii [4, 5],
- oszacowania współczynników sztywności stykowej do numerycznego modelowania połączenia śrubowego [6, 7].

Ważne i interesujące wydaje się być badanie normalnych charakterystyk podatnościowych styku elementów łączonych w połączeniu wielorubowym. Znajomość charakterystyki podatnościowej styku jest niezbędna do przeprowadzenia weryfikacji modelu tego połączenia wielorubowego projektowanego w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych. Do połączeń tego typu należą m.in. połączenia płyt i pokryw z belką lub korpusem obrabiarki oraz połączenie głowicy z kadłubem silnika

samochodowego. Badania takie nie są prezentowane w dostępnych publikacjach [2-7]. Wyznaczenie takiej charakterystyki dla połączenia wielośrubowego modelowanego w pracy [1] jest celem niniejszego artykułu.

Przedmiotem badań jest połączenie wielośrubowe, którego schemat pokazano na rysunku 2a. Tworzą je trzy płyty (4) o grubościach $h = 20, 40, 80$ (mm) mocowane w kolejnych fazach badań do sztywnego korpusu — ostoi (3) za pomocą siedmiu specjalnych śrub M10×1,25 (6) napinanych przez nakrętki sześciokątne wysokie (7). Śruby zabezpieczono przed obrotem w czasie napinania za pomocą wpustów czopkowych (5). Płyty wykonano ze stali C15, natomiast korpus — ze stali 18G2.

Charakterystyki podatnościowe styku elementów łączonych w połączeniu wielośrubowym (oznaczonego na rysunku 2a okręgiem wykonanym linią kreskową) wyznaczono w sposób pośredni. Wykorzystano do tego celu parę walcowych próbek (rys. 2b) reprezentujących elementy łączone badanego połączenia wielośrubowego.



Rys. 2. Przedmiot badań: a) połączenie wielośrubowe; b) próbki

Próbki wykonano z tych samych materiałów, których użyto do budowy kołnierzowych elementów łączonych oraz ostoi. W celu uzyskania potrzebnej wartości nacisków normalnych na powierzchni styku próbek, równej wartości nacisków powierzchniowych między poszczególnymi elementami kołnierzowymi i korpusem, dobrano odpowiedni kształt powierzchni styku próbek. Dla wymaganych nacisków

powierzchniowych, wynoszących 30,95 MPa, i znanego obciążenia próbek, równego 90 kN, powierzchnię styku próbek zaprojektowano w postaci pierścienia o polu wynoszącym 28,2 cm².

Stykające się powierzchnie podstaw walców zastępczych próbek (1) i (2) obrobiono mechanicznie przy użyciu tej samej technologii i w tych samych warunkach, jak powierzchnie elementów konstrukcji badanego połączenia. Wymienione powierzchnie zostały przygotowane przy tych samych prędkościach skrawania i posuwach poprzez:

- obróbkę kształtującą frezowaniem czółowym na frezarce FYN-50 CNC ze sterowaniem HIDDENHAIN TNC-360,
- obróbkę wykończeniową szlifowaniem obwodowym na szlifierce do płaszczysz MALCUS MP9.

3. Badania doświadczalne

Badania podzielono na trzy etapy:

1. Pomiary struktury geometrycznej powierzchni (SGP) [8] analizowanych elementów.
2. Wieloparametrowa ocena profili: pierwotnych (P), chropowatości (R) i falistości (W) [9] SGP badanych elementów, w ramach której wykonano kolejno:
 - a) testy normalności wyników pomiarów traktowanych jako zmienne losowe,
 - b) test F analizy wariancji wyników pomiarów,
 - c) analizę krzywych udziału materiałowego [10] dla badanych powierzchni.
3. Wyznaczenie normalnej charakterystyki podatnościowej dla styku ekwiwalentnych próbek i przyjęcie jej dla styku elementów łączonych w badanym połączeniu wielośrubowym.

3.1. Pomiary SGP

Pomiary struktury geometrycznej badanych powierzchni przeprowadzono za pomocą metody stykowej z wykorzystaniem profilometru Hommelwerke T8000 i zgodnie z zaleceniami podanymi w normie [11] oraz w pracy [12].

Na każdej badanej powierzchni wykonano po pięć pomiarów profili w dowolnie wybranych obszarach. Do oceny wybrano po cztery pomiary każdego parametru. Filtrowanie profilu pierwotnego przeprowadzono za pomocą filtru Gaussa z korekcją fazy, zgodnie z [13, 14], przyjmując długość fali odcięcia filtru $\lambda c = 0,8$ mm. Odcinek elementarny profilu chropowatości $lr = 0,8$ mm oraz znormalizowany odcinek

pomiarowy $ln = 4$ mm dobrano na podstawie spodziewanych wartości parametru chropowatości Ra . Długość przesuwu czujnika pomiarowego lt (dobieg i wybieg czujnika) ustalono na 4,8 mm.

TABELA 1
Parametry SGP uzyskane dla korpusu i próbki górnej

	Nr pomiaru	Parametr [μm]								
		Pt	Rt	Ra	Rq	Rz	Rp	Wt	Wa	Wq
Korpus (3)	1	6,67	6,55	0,80	1,01	5,64	2,64	0,81	0,17	0,20
	2	6,73	6,21	0,74	0,96	5,30	2,54	1,05	0,20	0,26
	3	8,71	7,95	0,75	1,00	6,08	2,44	0,65	0,16	0,19
	4	8,06	7,74	0,91	1,15	6,64	2,84	0,80	0,13	0,18
	Wartość średnia	7,54	7,11	0,80	1,03	5,91	2,61	0,83	0,16	0,21
Próbka górna (1)	Nr pomiaru	Parametr [μm]								
		Pt	Rt	Ra	Rq	Rz	Rp	Wt	Wa	Wq
	1	6,22	5,46	0,64	0,83	4,52	2,17	0,90	0,19	0,23
	2	9,15	7,80	0,69	0,90	5,37	3,77	1,64	0,34	0,42
	3	7,66	6,53	0,76	0,94	5,20	3,09	1,07	0,29	0,33
	4	7,36	6,92	0,81	1,04	5,82	3,24	0,99	0,18	0,23
	Wartość średnia	7,60	6,68	0,72	0,93	5,23	3,07	1,15	0,25	0,30

TABELA 2
Parametry SGP uzyskane dla elementów łączonych i próbki dolnej

	Nr pomiaru	Parametr [μm]								
		Pt	Rt	Ra	Rq	Rz	Rp	Wt	Wa	Wq
Płyta (4) o $h = 20$ mm	1	5,35	4,84	0,47	0,61	3,75	1,75	0,58	0,10	0,14
	2	4,76	4,93	0,50	0,64	3,94	2,21	0,41	0,10	0,12
	3	2,42	2,54	0,23	0,31	1,61	1,36	1,02	0,22	0,27
	4	1,64	1,56	0,15	0,19	1,03	0,89	0,93	0,23	0,27
	Wartość średnia	3,54	3,47	0,34	0,44	2,58	1,55	0,73	0,16	0,20
Płyta (4) o $h = 40$ mm	Nr pomiaru	Parametr [μm]								
		Pt	Rt	Ra	Rq	Rz	Rp	Wt	Wa	Wq
	1	4,47	3,75	0,48	0,61	3,03	1,97	1,75	0,31	0,42
	2	5,37	4,60	0,48	0,65	3,41	1,70	1,28	0,22	0,29
	3	5,28	4,66	0,54	0,72	3,46	1,70	1,42	0,38	0,43
	4	4,51	4,54	0,51	0,65	3,92	2,03	0,58	0,14	0,16
Wartość średnia	4,91	4,39	0,50	0,66	3,45	1,85	1,26	0,26	0,32	

cd. tabeli 2

Płyta (4) o $h = 80$ mm	Nr pomiaru	Parametr [μm]								
		Pt	Rt	Ra	Rq	Rz	Rp	Wt	Wa	Wq
	1	3,59	2,02	0,28	0,34	1,50	1,10	1,98	0,35	0,47
	2	5,04	2,96	0,38	0,48	2,17	1,59	2,71	0,52	0,69
	3	5,94	5,65	0,54	0,70	4,03	2,25	0,95	0,24	0,27
	4	8,29	7,68	0,63	0,86	5,16	2,93	0,96	0,23	0,27
	Wartość średnia	5,71	4,58	0,46	0,59	3,21	1,98	1,65	0,33	0,42
Próbka dolna (2)	Nr pomiaru	Parametr [μm]								
		Pt	Rt	Ra	Rq	Rz	Rp	Wt	Wa	Wq
	1	6,64	6,96	0,79	1,01	5,59	2,86	1,36	0,33	0,39
	2	7,76	7,16	0,80	1,00	5,42	2,41	0,83	0,17	0,21
	3	6,08	5,68	0,72	0,91	5,00	2,62	0,60	0,09	0,12
	4	9,00	8,44	0,84	1,08	6,12	2,90	0,86	0,24	0,28
	Wartość średnia	7,37	7,06	0,79	1,00	5,53	2,70	0,91	0,21	0,25

Dane z pomiarów zebrano i przetworzono z wykorzystaniem programu TURBO ROUGHNESS for Windows. Na podstawie prac [15, 16] oraz własnych analiz, do oceny badanych powierzchni wybrano zbiór parametrów zestawionych w tabelach 1 i 2.

3.2. Analiza wyników badań SGP

Traktując wyniki badań parametrów otrzymanych dla poszczególnych powierzchni jako zmienne losowe, przeprowadzono ich statystyczną analizę porównawczą. W pierwszym kroku, za pomocą testów normalności Lillieforsa i Shapiro-Wilka [17], dostępnych w programie Statistica, sprawdzono, czy zmienne te posiadają rozkład normalny. We wszystkich przypadkach uzyskane wartości prawdopodobieństwa przyjęcia hipotezy o normalności rozkładów badanych zmiennych p_L i p_{SW} przekraczają wartość przyjętego poziomu istotności $\alpha_{nor} = 0,01$. Dlatego też stwierdzono, że rozkłady badanych parametrów powierzchni mogą być traktowane jako rozkłady normalne [18].

Przyjmując założenie o normalności rozkładów porównywanych parametrów, w kolejnym kroku sprawdzono hipotezę o równości średnich we wszystkich wyodrębnionych populacjach odpowiadających sobie grup tych parametrów na drodze jednoczynnikowej analizy wariancji [19]. Dokonano tego z wykorzystaniem własnej procedury obliczeniowej napisanej w programie MATLAB. Otrzymane wartości testu F analizy wariancji zestawiono w tabelach 3 i 4 z wartościami krytycznymi F_{kr} rozkładu Fishera-Snedecora [20] z podaniem poziomów istotności α_{war} przy których można

założyć, że poszczególne próby badanych parametrów należą do jednej populacji generalnej. Dla większości parametrów różnice w średnich ich wartościach są nieistotne już na poziomie $\alpha_{war} = 0,05$. Dlatego też uznano, że powierzchnie odpowiadających sobie elementów opisane tymi parametrami chropowości mogą być traktowane w ujęciu statystycznym jako tożsame.

TABELA 3
Wyniki analizy wariancji parametrów SGP dla korpusu i próbki górnej o powierzchni badanej jak powierzchnia korpusu

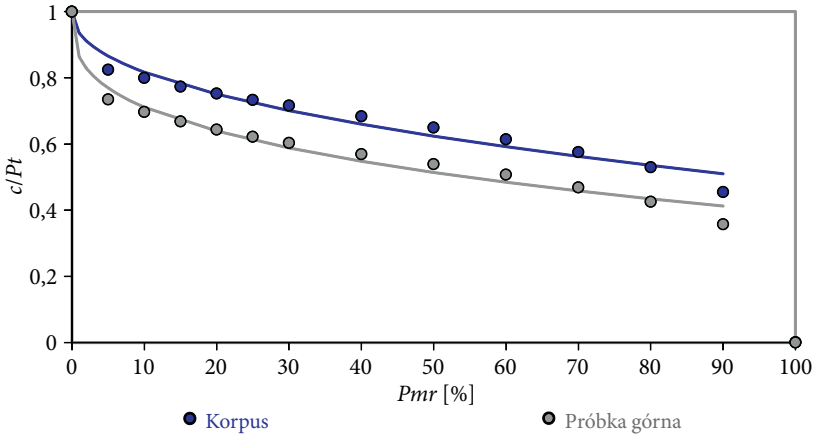
Parametr [μm]	F	F_{kr}	α_{war}
Pt	0,004	5,99	0,05
Rt	0,45	5,99	0,05
Ra	1,92	5,99	0,05
Rq	2,89	5,99	0,05
Rz	3,02	5,99	0,05
Rp	1,73	5,99	0,05
Wt	2,99	5,99	0,05
Wa	4,19	5,99	0,05
Wq	3,74	5,99	0,05

TABELA 4
Wyniki analizy wariancji parametrów SGP dla elementów łączonych i próbki dolnej o powierzchni badanej jak powierzchnie elementów łączonych

Parametr [μm]	F	F_{kr}	α_{war}
Pt	4,55	5,95	0,01
Rt	3,45	3,49	0,05
Ra	9,99	10,89	0,001
Rq	8,21	10,89	0,001
Rz	4,87	5,95	0,01
Rp	3,66	5,95	0,01
Wt	2,25	3,49	0,05
Wa	1,97	3,49	0,05
Wq	2,02	3,49	0,05

Ostatnim krokiem analizy uzyskanych parametrów SGP badanych elementów była ocena krzywych udziału materiałowego profilu pierwotnego dla każdej badanej powierzchni. Krzywe te zestawiono na rysunkach 3 i 4, odpowiednio dla korpusu i próbki górnej oraz dla elementów łączonych i próbki dolnej. Na rysunkach przyjęto następujące oznaczenia:

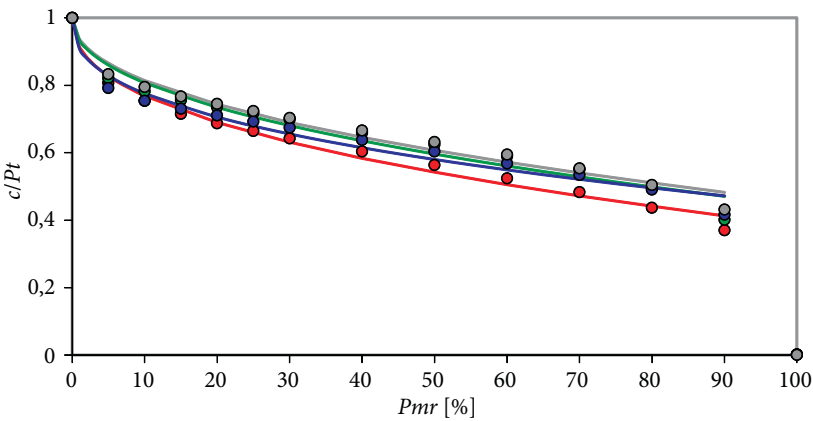
- c — poziom odniesienia,
- Pt — całkowita wysokość profilu pierwotnego,
- Pmr — procentowy udział materiałowy profilu pierwotnego.



$$\left(\frac{c}{Pt}\right) = 1 - 0,065 \cdot Pmr^{0,448} \quad (1)$$

$$\left(\frac{c}{Pt}\right) = 1 - 0,137 \cdot Pmr^{0,324} \quad (2)$$

Rys. 3. Krzywe udziału materiałowego profilu pierwotnego opracowane dla badanych powierzchni korpusu i próbki górnej



$$\left(\frac{c}{Pt}\right) = 1 - 0,087 \cdot Pmr^{0,424} \quad (3)$$

$$\left(\frac{c}{Pt}\right) = 1 - 0,067 \cdot Pmr^{0,460} \quad (4)$$

$$\left(\frac{c}{Pt}\right) = 1 - 0,091 \cdot Pmr^{0,389} \quad (5)$$

$$\left(\frac{c}{Pt}\right) = 1 - 0,063 \cdot Pmr^{0,467} \quad (6)$$

Rys. 4. Krzywe udziału materiałowego profilu pierwotnego opracowane dla badanych powierzchni elementów łączonych i próbki dolnej

Analizy porównawczej uzyskanych krzywych dokonano na podstawie wprowadzonego do rozważań wskaźnika Z danego wzorem:

$$Z = \frac{\left| \left(\frac{c}{Pt} \right)_{Pmr}^P - \left(\frac{c}{Pt} \right)_{Pmr}^K \right|}{\left| \left(\frac{c}{Pt} \right)_{Pmr}^K \right|} \cdot 100\%, \quad (7)$$

gdzie niezdefiniowane wcześniej symbole oznaczają:

- P — dane otrzymane dla badanej powierzchni próbki górnej (lub dolnej),
- K — dane otrzymane dla badanej powierzchni korpusu (lub elementu łączonego).

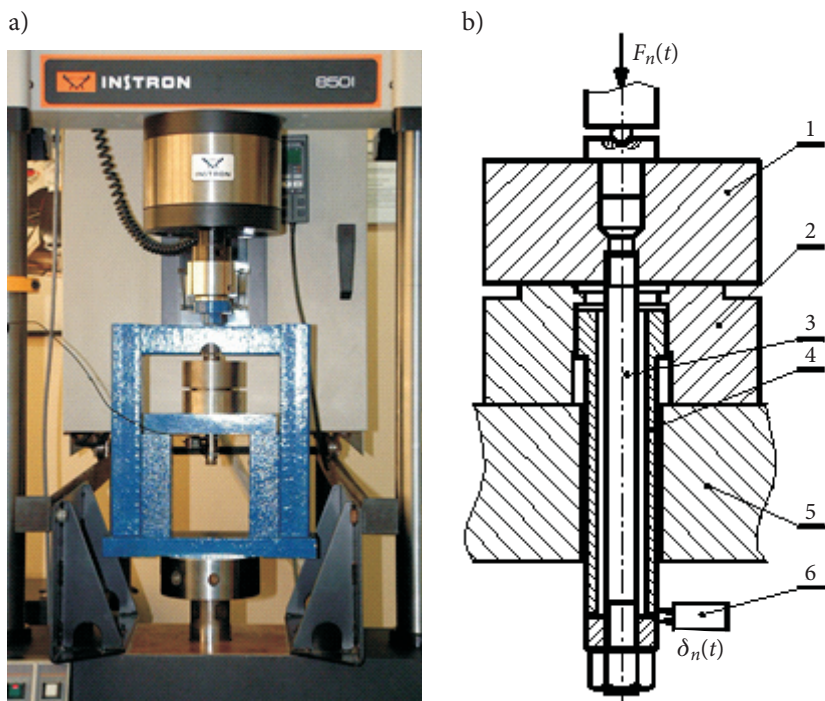
W przypadku analizy napinania połączenia stykowego, najbardziej istotny jest udział materiałowy profilu pierwotnego Pmr w przedziale od 0 do 20% [20]. W tym zakresie wartości wskaźnika Z nie przekraczają 15% dla badanych powierzchni korpusu i próbki górnej oraz 8% dla badanych powierzchni elementów łączonych i próbki dolnej. Wobec tego przyjęto założenie, że również ze względu na właściwości nośne badane powierzchnie są do siebie podobne.

Na podstawie analizy statystycznej wyników pomiarów SGP oraz badania właściwości nośnych, można uznać, że w zakresie istotnym dla prowadzonej oceny odpowiadające sobie powierzchnie sprawdzanych elementów są porównywalne.

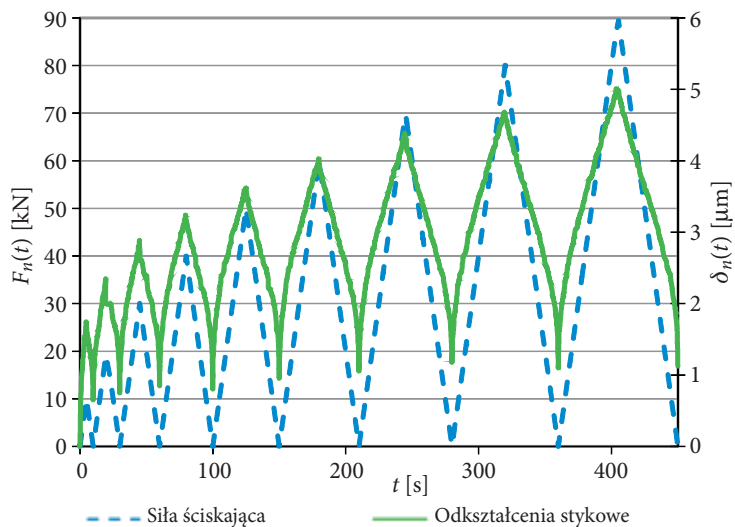
3.3. Wyznaczanie normalnej charakterystyki podatnościowej styku

Do wyznaczenia normalnej charakterystyki styku pomiędzy elementami łączonymi wykorzystano powierzchnie styku ekwiwalentnych próbek. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8501 Plus przy użyciu oprzyrządowania wykonanego w Katedrze Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Szczecińskiej [21]. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 5. Badane połączenie stykowe tworzone jest przez powierzchnie czołowe próbek (1) i (2) ustawionych w stosie na płycie (5), zamocowanej w sztywnej ramie umieszczonej między górną głowicą maszyny wytrzymałościowej a jej stołem. Powierzchnie próbek dociskane są siłą $F_n(t)$. Odkształcenia stykowe normalne $\delta_n(t)$ badanego zestawu próbek, traktowane jako przemieszczenia osiowe trzpienia (3) wkręconego w otwór w próbce (1) względem tulei (4) wkręconej w otwór w próbce (2), mierzone są za pomocą ekstensometru (6).

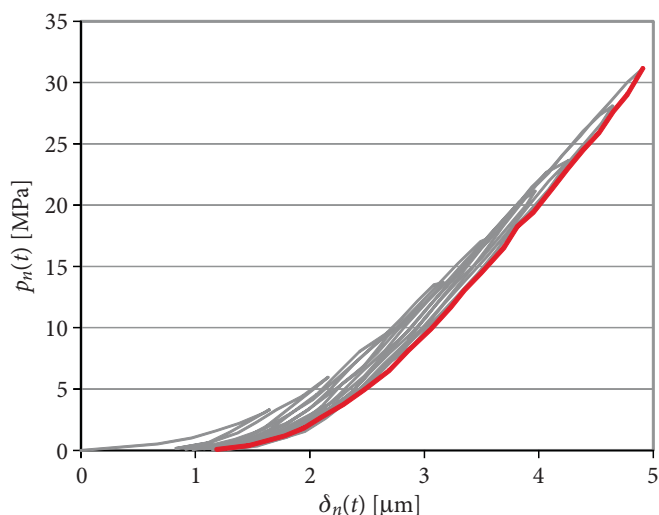
Przebieg siły dociskającej próbki $F_n(t)$ oraz uzyskany dla niego nieliniowy przebieg odkształceń stykowych normalnych $\delta_n(t)$ przedstawiono na rysunku 6. Na podstawie otrzymanych danych wykreślono zależność normalnych odkształceń stykowych $\delta_n(t)$ od nacisków powierzchniowych $p_n(t)$. Została ona pokazana na rysunku 7.



Rys. 5. Stanowisko do wyznaczania charakterystyk odkształceń stykowych normalnych: a) widok ogólny; b) schemat



Rys. 6. Charakterystyki obciążeń i odkształceń stykowych normalnych w funkcji czasu



Rys. 7. Odształcenia stykowe normalne w funkcji nacisków powierzchniowych

Ponieważ krzywe wyznaczone dla kolejnych cykli obciążania i odciążania styku charakteryzują się histerezą (rys. 7), aproksymacji wyników badań doświadczalnych dokonano dla zakresu danych odpowiadających ostatniemu cyklowi obciążania (oznaczonego na rysunku 7 krzywą koloru brązowego). Jako równania regresji otrzymanych danych przyjmowano równania w postaci funkcji potęgowej i wielomianów różnego stopnia zebrane w tabeli 5.

TABELA 5

Równania regresji $p_n(t) = f[\delta_n(t)]$ estymowane na podstawie danych doświadczalnych

Rodzaj równania	Postać równania
Funkcja potęgowa	$p_n = 3,428\delta_n^{1,657}$ (8)
Wielomian	$n = 2$ $p_n = 2,083\delta_n + 1,64\delta_n^2$ (9)
	$n = 3,4$ $p_n = -0,461\delta_n + 3,667\delta_n^2 - 0,373\delta_n^3$ (10)
	$n = 5$ $p_n = -1,191\delta_n + 5,196\delta_n^2 - 1,452\delta_n^3 + 0,312\delta_n^4 - 0,032\delta_n^5$ (11)
	$n = 6$ $p_n = 4,980\delta_n^3 - 3,056\delta_n^4 + 0,762\delta_n^5 - 0,069\delta_n^6$ (12)
	$n = 7$ $p_n = 2,957\delta_n^2 - 0,077\delta_n^5 + 0,028\delta_n^6 - 0,003\delta_n^7$ (13)

Po przeprowadzeniu analizy uzyskanych równań regresji pod kątem ich prostoty i wierności odwzorowania, do modelowania warstwy stykowej między elementami łączonymi w połączeniu wielośrubowym zaproponowano przebieg normalnej charakterystyki podatnościowej styku opisany wzorem (8). Jego postać jest typowa dla tego rodzaju połączeń stykowych [22].

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych prac sformułowano następujące wnioski:

1. Uzyskana charakterystyka podatnościowa styku może zostać wykorzystana w obliczeniach rozważanego modelu połączenia wielośrubowego.
2. Badania połączenia stykowego mogą zostać przeprowadzone przy użyciu ekwiwalentnych próbek zastępujących składowe elementy w połączeniu wielośrubowym.
3. Proponowany uproszczony sposób realizacji badań połączenia wielośrubowego może zostać zastosowany również w przypadku innych połączeń konstrukcyjnych o dużej powierzchni kontaktu między łączonymi elementami.
4. W obliczeniach innych połączeń wielośrubowych można przyjąć proponowany model z ekwiwalentnymi próbkami, po przeprowadzeniu weryfikacji zgodnie z zaproponowaną procedurą.

Praca naukowa częściowo finansowana ze środków MNiSW na naukę w latach 2005-2007.

Artykuł wpłynął do redakcji 9.04.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 16.06.2014 r.

LITERATURA

- [1] WITEK A., GRZEJDA R., *Analysis of a nonlinear multi-bolted joint loaded by a normal force*, ATMiA, 25, 2, 2005, 211-219.
- [2] SAWA T., KUMANO H., MOROHOSHI T., *The contact stress in a bolted joint with a threaded bolt*, Exp. Mech., 36, 1, 1996, 17-23.
- [3] PAU M., BALDI A., LEBAN B., *Visualization of contact areas in bolted joints using ultrasonic waves*, Exp. Techniques, 32, 4, 2008, 49-53.
- [4] MARSHALL M.B., LEWIS R., DWYER-JOYCE R.S., *Characterisation of contact pressure distribution in bolted joints*, Strain, 42, 1, 2006, 31-43.
- [5] MARSHALL M.B., ZAINAL I., LEWIS R., *Influence of the interfacial pressure distribution on loosening of bolted joints*, Strain, 47, s2, 2011, 65-78.
- [6] ABAD J., FRANCO J.M., CELORRIO R., LEZÁUN L., *Design of experiments and energy dissipation analysis for a contact mechanics 3D model of frictional bolted lap joints*, Adv. Eng. Softw., 45, 1, 2012, 42-53.
- [7] ERITEN M., POLYCARPOU A.A., BERGMAN L.A., *Effects of surface roughness and lubrication on the early stages of fretting of mechanical lap joints*, Wear, 271, 11-12, 2011, 2928-2939.

- [8] CIELOSZYK J., *Analiza struktury geometrycznej powierzchni obrabianych skrawaniem ze szczególnym uwzględnieniem frezowania w zintegrowanym wytwarzaniu*, rozprawa habilitacyjna, ZAPOL, Szczecin, 2013.
- [9] NOWICKI B., *Zaawansowane metody opisu i pomiarów struktury geometrycznej powierzchni*, *Mechanik*, 80, 1, 2007, 36-41.
- [10] LICEK R., POPOV A., *Evaluation of selected parameters of structural quality steel turning*, *Manufacturing and Industrial Engineering*, 11, 2, 2012, 16-19.
- [11] PN-EN ISO 13565-1: 1999P, *Specyfikacje geometrii wyrobów*, *Struktura geometryczna powierzchni*, *Metoda profilowa*, *Powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych*, *Filtrowanie i ogólne warunki pomiaru*.
- [12] ADAMCZAK S., *Normalizacja pomiarów struktury geometrycznej powierzchni*, *Część 9: Ocena chropowatości i falistości powierzchni. Zasady i warunki przeprowadzania pomiarów*, *Mechanik*, 79, 3, 2006, 180-183.
- [13] CIELOSZYK J., *Possibility of modern roughness gauges — measuring periodic surfaces with big spacing of roughness or waviness element*, *Proc. of the 4th International Conference on Measurement*, Smolenice, Słowacja, 2003, 300-303.
- [14] CIELOSZYK J., *The surface in modern face milling and its measuring*, *Proc. of the 12th International DAAAM Symposium: Intelligent Manufacturing & Automation: Focus On Precision Engineering*, Jena, Niemcy, 2001, 73-74.
- [15] GÓRECKA R., POŁAŃSKI Z., *Metrologia warstwy wierzchniej*, WNT, Warszawa, 1983.
- [16] OCZOŚ K.E., LIUBIMOV V., *Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych*, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2003.
- [17] RABIEJ M., *Statystyka z programem Statistica*, Helion, Gliwice, 2012.
- [18] JEZERSKI J., *Analiza tolerancji i niedokładności pomiarów w budowie maszyn*, WNT, Warszawa, 2003.
- [19] JÓZWIĄK J., PODGÓRSKI J., *Statystyka od podstaw*, PWE, Warszawa, 2006.
- [20] GRZEJDA R., *Modelowanie i obliczenia wielośrubowego połączenia elementu korpusowego na nieliniowym podłożu sprężystym*, rozprawa doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2009.
- [21] GRUDZIŃSKI K., KONOWALSKI K., *Badania charakterystyk mechanicznych połączeń stykowych przy obciążeniach dynamicznych*, *Część 1: Podstawy badań doświadczalnych i stanowisko badawcze*, *ATMiA*, 22, 2, 2002, 105-114.
- [22] KONOWALSKI K., GRUDZIŃSKI K., *Badania charakterystyk mechanicznych połączeń stykowych przy obciążeniach dynamicznych*, *Część 2: Badania doświadczalne*, *ATMiA*, 22, 2, 2002, 115-127.

R. GRZEJDA, J. CIELOSZYK

Determination of normal flexibility characteristics of surfaces' contact with the specified surface texture

Abstract. In the paper, a method for determination of a normal flexibility characteristic of the contact between elements joined in a multi-bolted connection is presented. Research were carried out using equivalent samples, which substitute joined elements. An assessment of the surface texture of the samples and the joined elements is accomplished. An experimental function between normal contact pressure and normal contact deformations for investigated elements is appointed.

Keywords: surface texture, multi-parameter analysis, normal flexibility characteristic, multi-bolted connection