

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI ELEMENTÓW TURBINY WODNEJ TYPU MICHELL-BANKI ZA POMOCĄ MES

Andrzej Szot
Instytut Lotnictwa

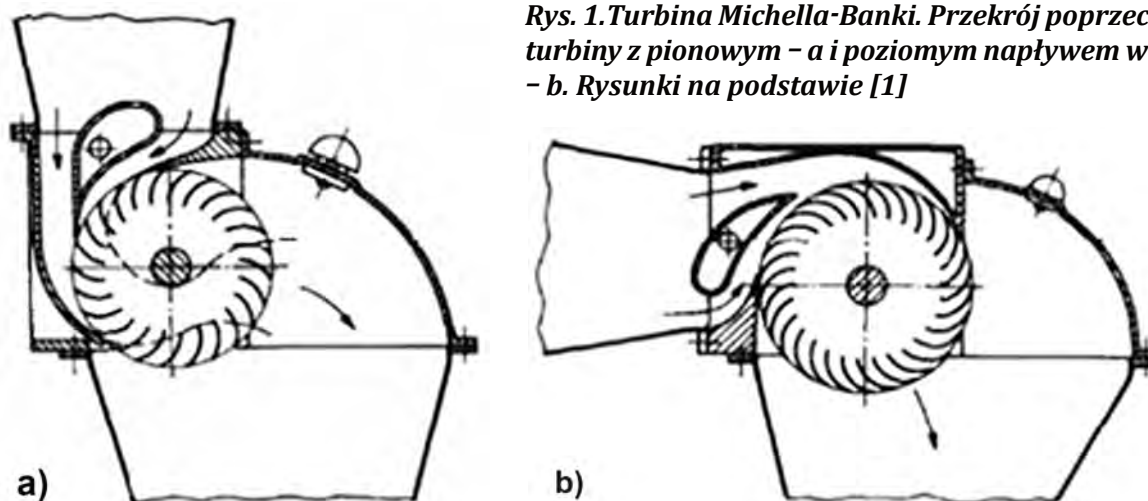
Streszczenie

W pracy przedstawiono obliczenia wytrzymałościowe turbiny wodnej typu Michell-Banki o mocy 7,25 kW, wykonane przy użyciu MES. Analizowano korpus turbiny oraz tarczę i łopatkę wirnika w różnych wariantach konstrukcyjnych, z zastosowaniem jako materiałów kompozytu szklano-epoksydowego, sklejkę sosnowej, stali, duraluminium i betonu. Projekt konstrukcji turbiny i obliczenia powstały w ramach Projektu Celowego – Umowa Nr 03996/C.2R-6/2007 z MNiSzW.

OBIEKT OBLICZEŃ

Turbina wodna jest silnikiem, w którym energia mechaniczna wody płynącej zamieniana jest na pracę użyteczną. W zależności od postaci wykorzystywanej energii, rozróżniamy turbiny akcyjne i reakcyjne. Pierwsze z nich przetwarzają w wirniku wyłącznie energię kinetyczną wody. W tych drugich woda jest doprowadzana do łopatek wirnika pod ciśnieniem wyższym niż atmosferyczne, co pozwala na korzystanie zarówno z energii kinetycznej, jak i energii początkowego ciśnienia wody.

Turbina Michell-Banki należy do turbin akcyjnych. Strumień wody o przekroju prostokątnym i szerokości równej długości wirnika przepływa w niej dwukrotnie przez łopatki, umocowane w tarczach (rys. 1). Turbiny tego typu używane są w małych elektrowniach wodnych, przy spadach od 2 do 50 m.



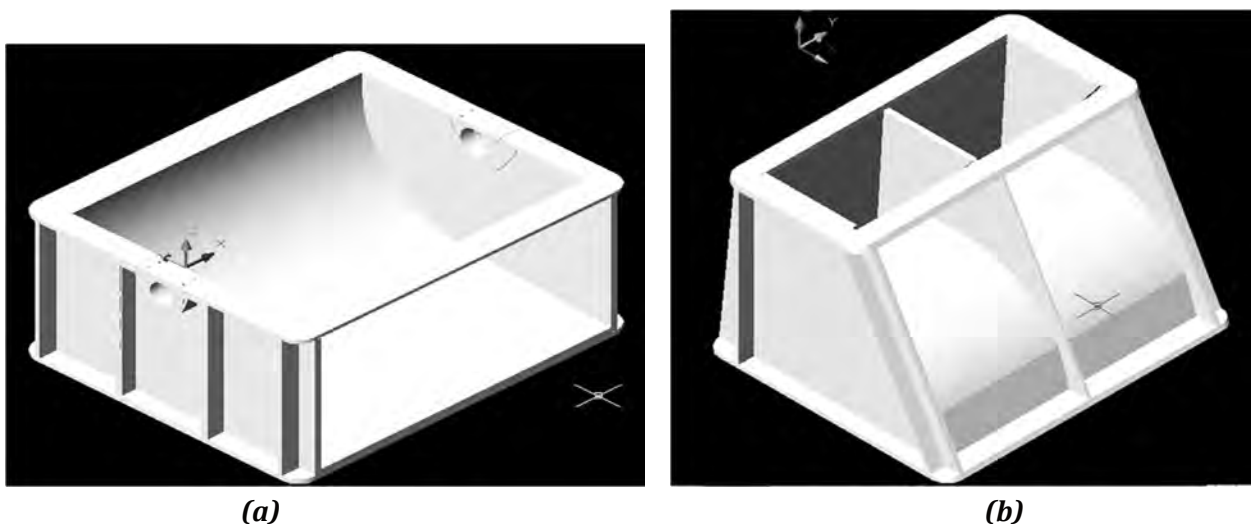
Rys. 1. Turbina Michella-Banki. Przekrój poprzeczny turbiny z pionowym - a i poziomym napływem wody - b. Rysunki na podstawie [1]

W Centrum Nowych Technologii Instytutu Lotnictwa, przy współpracy z przyszłym producentem turbin, firmą Darek&Co, opracowano projekt turbiny wodnej Michell-Banki małej mocy. Rozważano możliwości wykonania turbiny z użyciem materiałów kompozytowych w trzech różnych technologiach: płytowej, cienkościennej i betonu modyfikowanego.

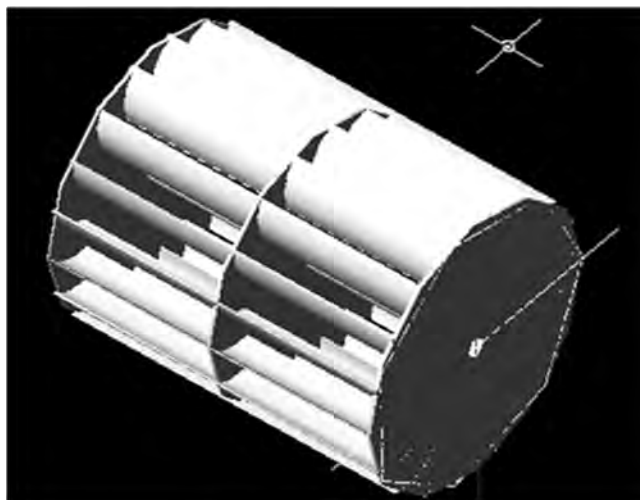
Obliczeniami objęto korpus turbiny (rys. 2) oraz tarczę i łopatkę wirnika (rys. 3). Stosownie do przyjętych technologii analizie poddano trzy konstrukcje korpusu, w których zastosowano odpowiednio:

- a) kompozyt szklano-epoksydowy EKONIT i sklejkę sosnową,
- b) kompozyt szklano-epoksydowy, sklejkę sosnową i piankę poliuretanową jako wypełniacz; w obu powyższych koncepcjach rozważano wiele wariantów, różniących zestawem materiałów, grubościami płyt i rozwiązaniami konstrukcyjnymi,
- c) beton modyfikowany klasy 2 CEM I 42,5R.

W wersjach płytowej i cienkościennej użyto płyt o grubościach 5 do 15 mm. Ścianki korpusu betonowego mają grubość 80 mm. Tarcza wirnika grubości 10 mm rozpatrywana była w wariantach wykonania z kompozytu szklano-epoksydowego i ze stali nierdzewnej 1H18N9. W przypadku łopatki obliczenia przeprowadzono dla konstrukcji wykonanych całkowicie ze stali niestopowej St3, w postaci blach grubości 10 lub 4 mm oraz duraluminium PA7ta i kompozytu szklano-epoksydowego grubości 10 mm, a także dla konstrukcji warstwowej. Struktura łopatki warstwowej złożona jest z dwóch blach ze stali St3 o grubości 2 mm każda, przedzielonych 2 mm warstwą gumy.



Rys. 2. Dolna - a i górna - b części szkieletu jednego z wariantów korpusu turbiny, zaprojektowanego w technologii płytowej. Rysunek, a także rys. 3 na podstawie [2]



Rys. 3. Wirnik turbiny

Tab. 1. Właściwości mechaniczne materiałów zastosowanych w konstrukcji turbiny

Nazwa materiału	Oznaczenia	E	ν	R _{0,2}	R _m
		[GPa]	-	[MPa]	
stal niestopowa konstrukcyjna	St3	200	0,30	235 ¹⁾	360 ¹⁾
stal nierdzewna	1H18N9	173 ²⁾	0,30	175 ³⁾	520 ³⁾
duraluminium	PA7ta	72	0,33	260	430
kompozyt szklano-epoksydowy (płyta)	EKONIT	24	0,26	-	300 ⁴⁾ 180 ⁵⁾ 30 ⁶⁾
sklejka sosnowa	-	1÷10	0,20	-	104 ⁷⁾ 3 ⁸⁾
pianka poliuretanowa	-	0,053	0,20	-	-
guma	-	0,1	0,40	-	-
beton klasy 2	CEMI I 42,5R ⁹⁾ odpowiednik C40/50 ¹⁰⁾	50	0,20	-	42,5 ⁹⁾ 3,5 ¹¹⁾

1) wg [5]; 2) wg [6] dla stali 1H18N9T $E \approx 173$ GPa; 3) wartości minimalne wg [7]; 4) naprężenie zrywające wg [8]; 5) naprężenie ściskające przy zrywaniu wg [8]; 6) wytrzymałość na ścinanie równoległe do warstw wg [8]; 7) orientacyjnie wzdłuż włókien; 8) orientacyjnie w poprzek włókien; 9) wytrzymałość na ściskanie wg [9]; 10) wg [10]; 11) wytrzymałość na rozciąganie wg [10]

W obliczeniach, wykonanych metodą elementów skończonych w zakresie liniowym, wykorzystano programy MSC.Patran 2005 i MSC.Nastran 2005.

OBCIĄŻENIA

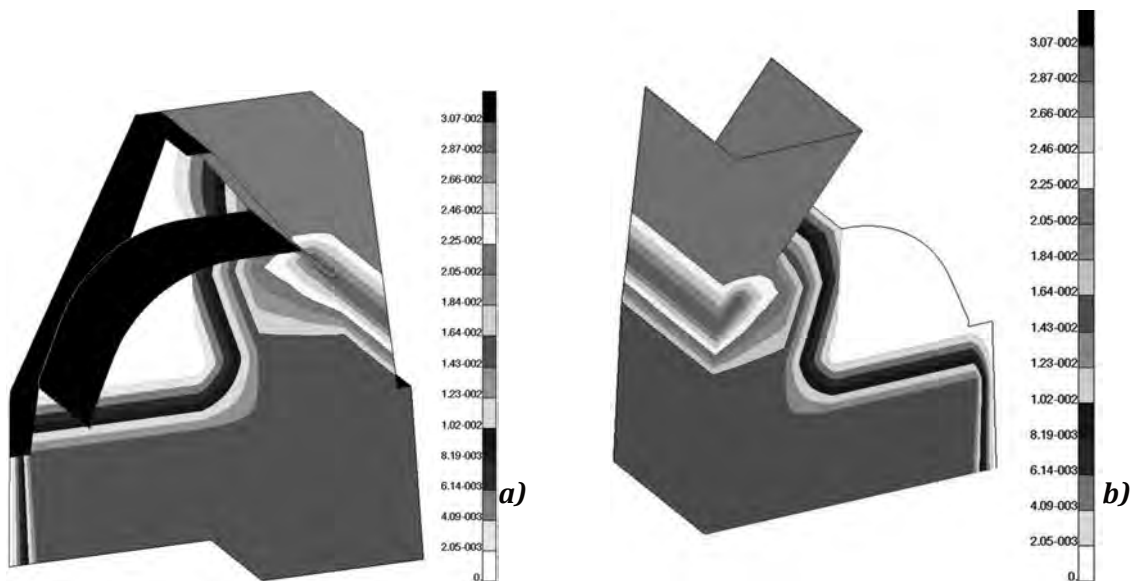
Wartości obciążeń turbiny wyznaczono, po odpowiednim ich skorygowaniu do wielkości turbiny rzeczywistej, korzystając z obliczeń numerycznych przepływu w modelu w skali 1:5, przy spadku wody wynoszącym 2,145 m. Do obliczeń użyto programu Fluent 6.3.26 [3]. W analizie obciążeń rozważono trzy przypadki, zamieszczone w tabeli 2. Przypadki 1 i 3 wykorzystano w obliczeniach wytrzymałościowych, natomiast przypadek 2 w programie próby zmęczeniowej [4].

Wnętrze korpusu obciążono ciśnieniem, o rozkładzie wynikającym z przepływu w przypadku 3, w którym osiąga ono największe wartości. Obciążenie komory korpusu widoczne jest na rysunku 4. Wprowadzono także siłę skupioną, działającą na korpus dolny, pochodzącą od oddziaływania wirnika w przypadku 1 – tabela 1, rys. 5.

Maksymalne obciążenie łopatki równomiernym ciśnieniem i tarczy wirnika siłą pochodzącą od nacisku łopatki wyznaczono dla przypadku 1 – rozruch turbiny.

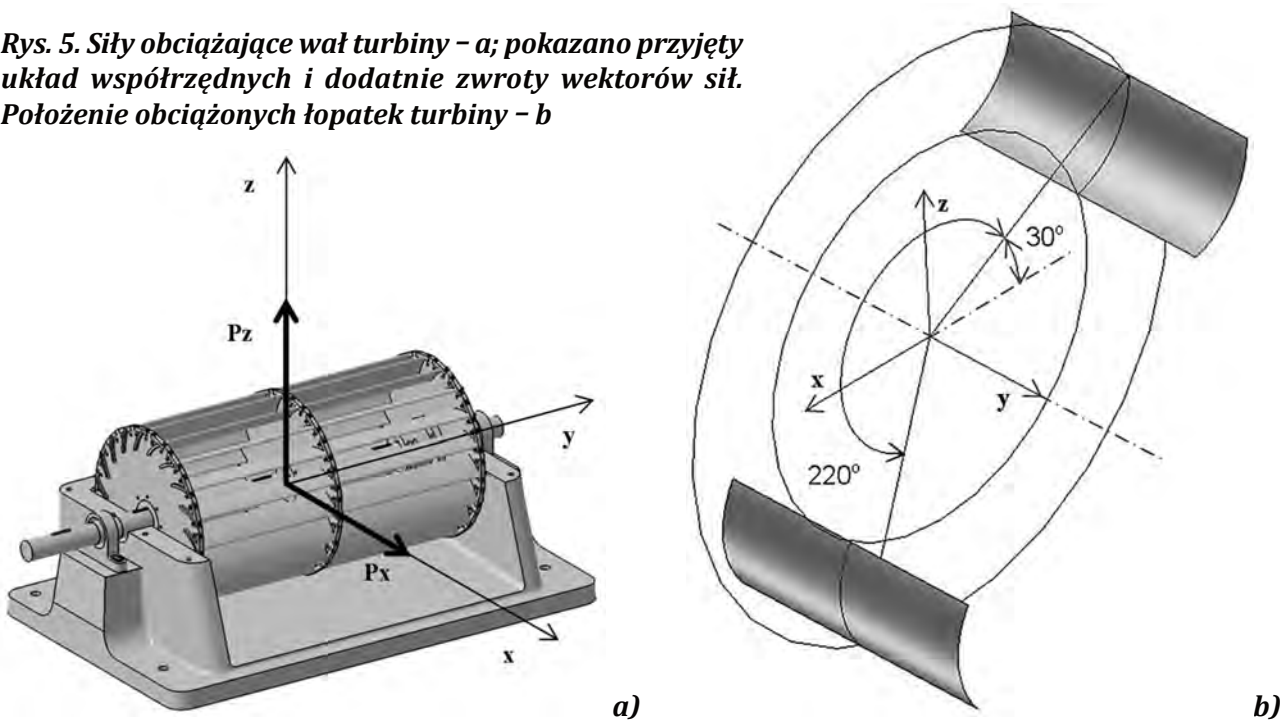
Tab. 2. Obciążenie turbiny rzeczywistej

Nr przyp.	Nazwa	Obroty n	Moment sił hydrodynamicznych M	Moc turbiny N	Siły obciążające wał turbiny	
					P _x	P _z
		[1/s]	[Nm]	[W]	[N]	
1	Rozruch, M = M _{max}	0	3025	0	-370	-4830
2	Praca ciągła, N = N _{max}	46	1513	7250	-185	-2415
3	Praca ciągła, p = p _{max}	76	725	5800	-89	-1158



Rys. 4. Rozkład ciśnienia wewnątrz korpusu konstrukcji płytowej i cienkościennej - a oraz betonowej - b. Maksymalna wartość nadciśnienia wynosi 0,0307 MPa

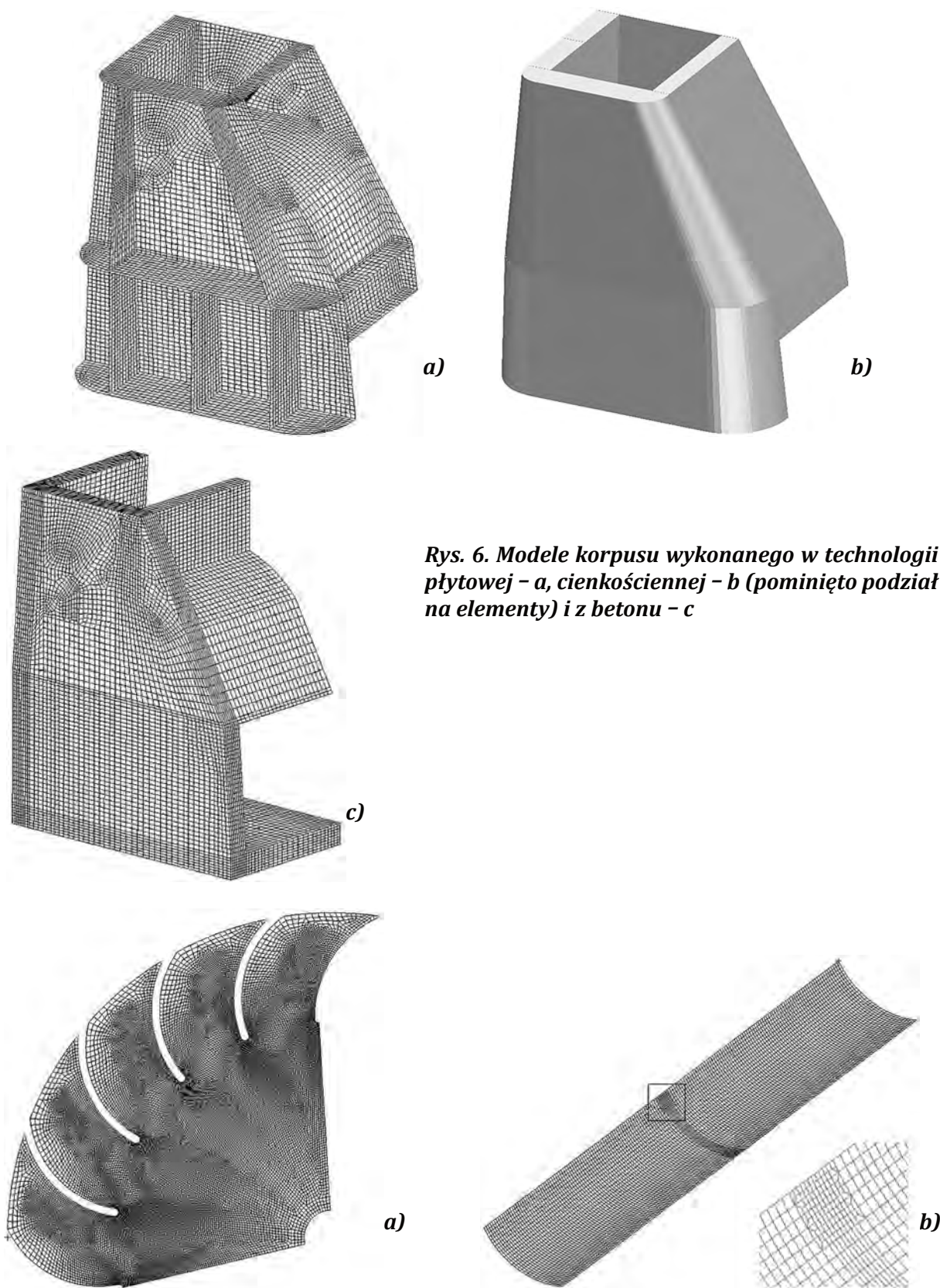
Rys. 5. Siły obciążające wał turbiny - a; pokazano przyjęty układ współrzędnych i dodatnie zwroty wektorów sił. Położenie obciążonych łopatek turbiny - b



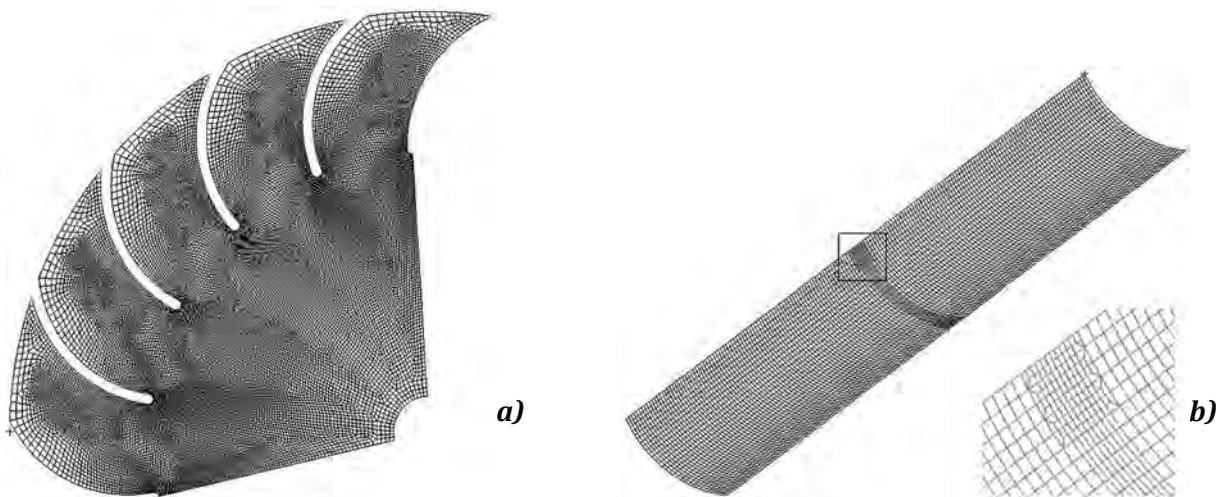
OBLICZENIA

Modele dyskretne konstrukcji

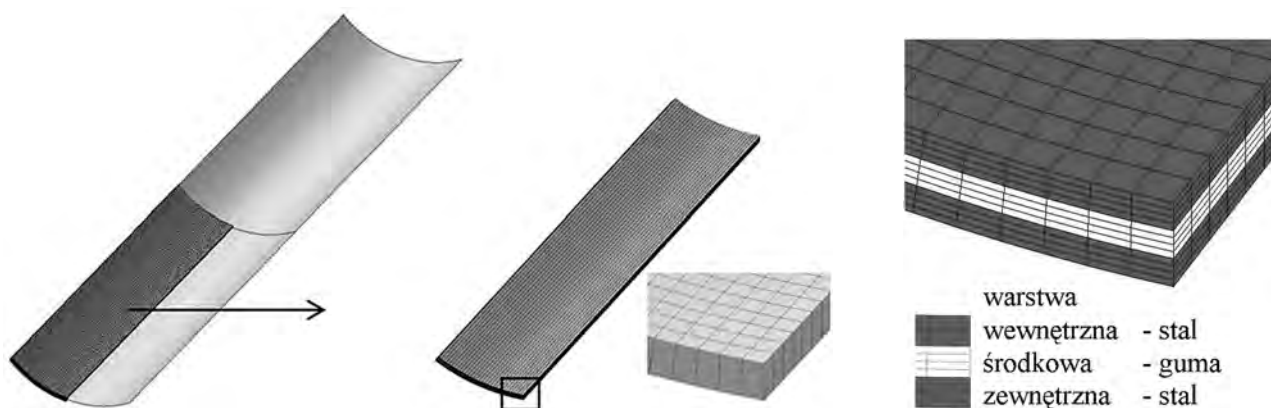
Modele analizowanych konstrukcji przedstawiono na rysunkach 6÷8. Zbudowano je z elementów typu QUAD4, TRIA3, HEXA8 oraz PENTA6 i podparto zgodnie z ich warunkami pracy.



Rys. 6. Modele korpusu wykonanego w technologii płytowej - a, cienkościennej - b (pominięto podział na elementy) i z betonu - c



Rys. 7. Modele tarczy wirnika turbiny - a i łopatki o strukturze jednorodnej - b



Rys. 8. Model łopatki warstwowej, obejmujący $\frac{1}{4}$ łopatki. Oznaczenie warstw: wewnętrzna - od strony wklęsłej, zewnętrzna - od strony wypukłej

Wyniki obliczeń

Na rysunkach poniżej zamieszczono przykładowe rozkłady przemieszczeń konstrukcji i naprężeń w materiale modeli a ich maksymalne wartości zestawiono w tabelach. użytymi jednostkami są odpowiednio [mm] i [MPa]. Naprężenia zredukowane obliczono zgodnie z hipotezą HMM.

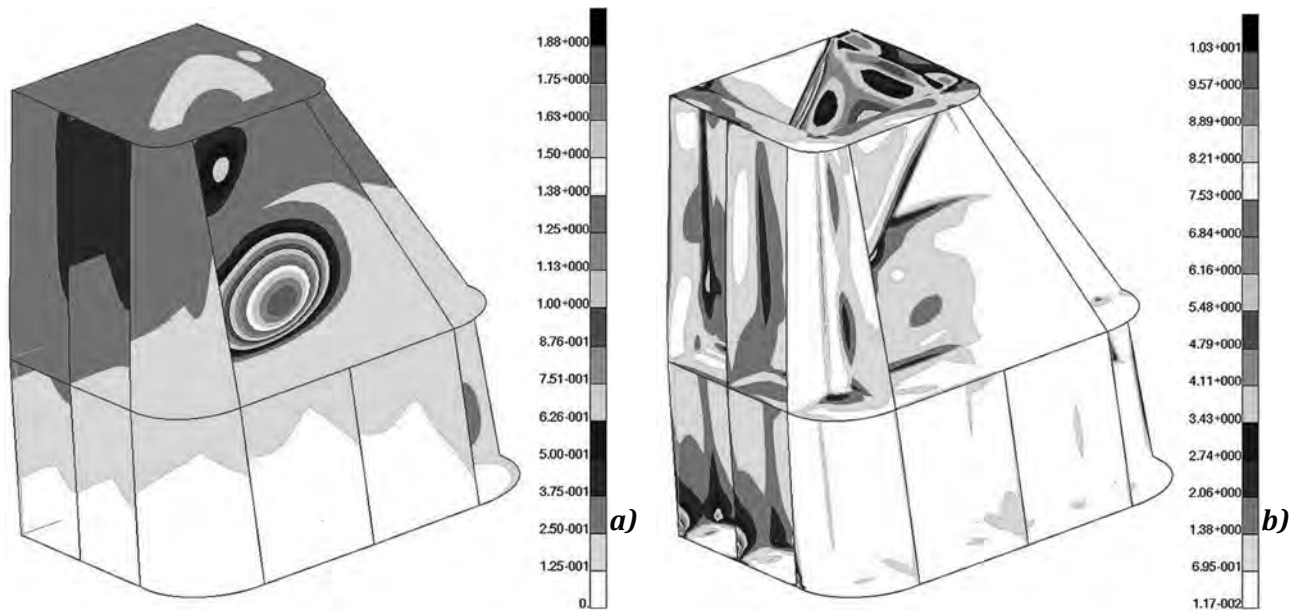
I. Korpus turbiny

Tab. 3. Największe przemieszczenia całkowite i naprężenia zredukowane w modelach korpusów turbiny w wersjach płytowej i cienkościennej

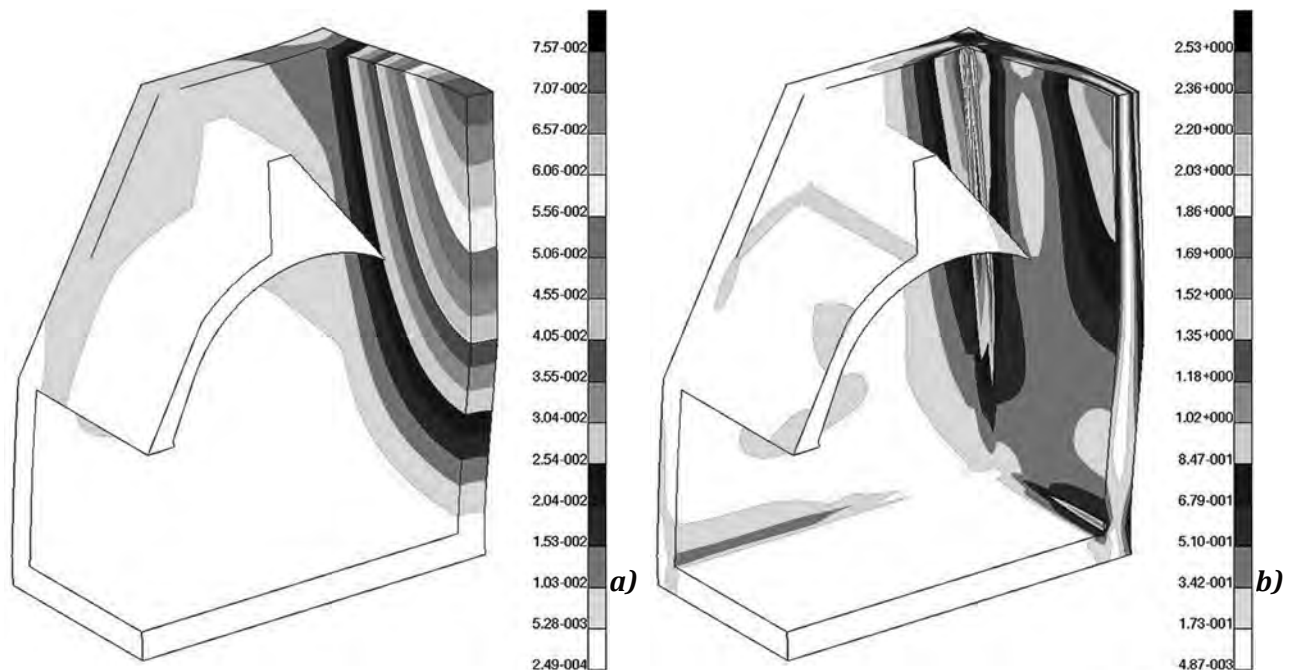
Wariant modelu	$u_{\text{całkowite}}$	Materiał w miejscu wystąpienia	σ_{redHMH}	Materiał w miejscu wystąpienia
	[mm]		[MPa]	
płytowy	2,08	kompozyt	20,5	kompozyt
cienkościenny z wypełniaczem piankowym	1,88	kompozyt	10,3	sklejka

Tab. 4. Największe przemieszczenia całkowite i naprężenia zredukowane w modelu korpusu turbiny wykonanego z betonu

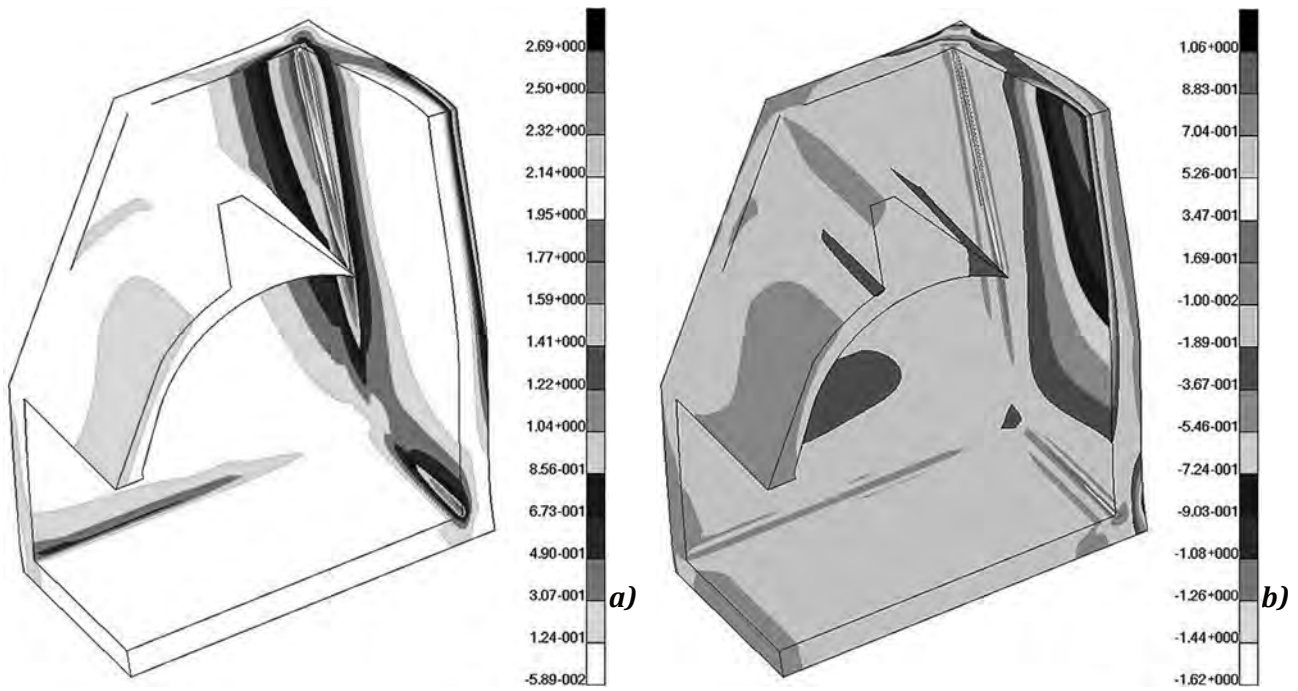
$u_{\text{całkowite}}$	σ_{redHMH}	$\sigma_{\text{głównie maks}}$	$\sigma_{\text{głównie min}}$
[mm]	[MPa]		
0,08	2,53	2,69	-1,06



Rys. 9. Szkielet modelu korpusu wykonanego w technologii cienkościennej. Przemieszczenia całkowite - a i naprężenia zredukowane - b



Rys. 10. Model korpusu wykonanego z betonu. Przemieszczenia całkowite - a i naprężenia zredukowane - b

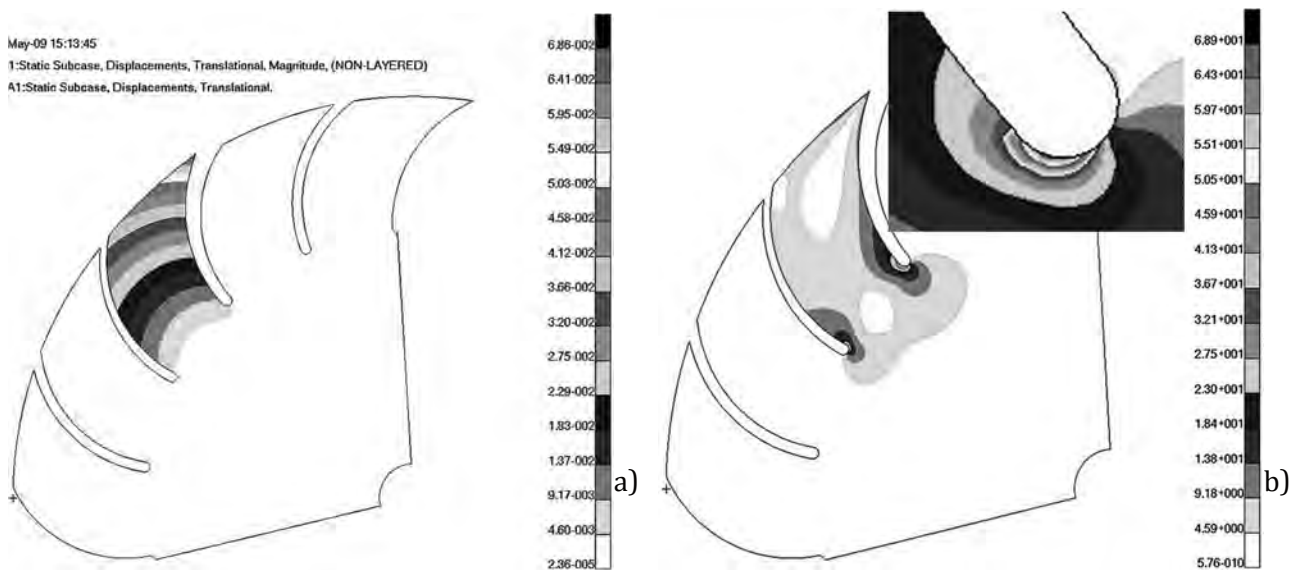


Rys. 11. Model korpusu wykonanego z betonu. Naprężenia główne maksymalne - a i minimalne - b

II. Tarcza wirnika

Tab. 5. Największe przemieszczenia całkowite i naprężenia w modelach tarczy turbiny

Wariant modelu tarczy	$u_{\text{całkowite}}$	$\sigma_{\text{red HMH}}$
	[mm]	[MPa]
tarcza kompozytowa	0,50	68,7
tarcza stalowa	0,07	68,9

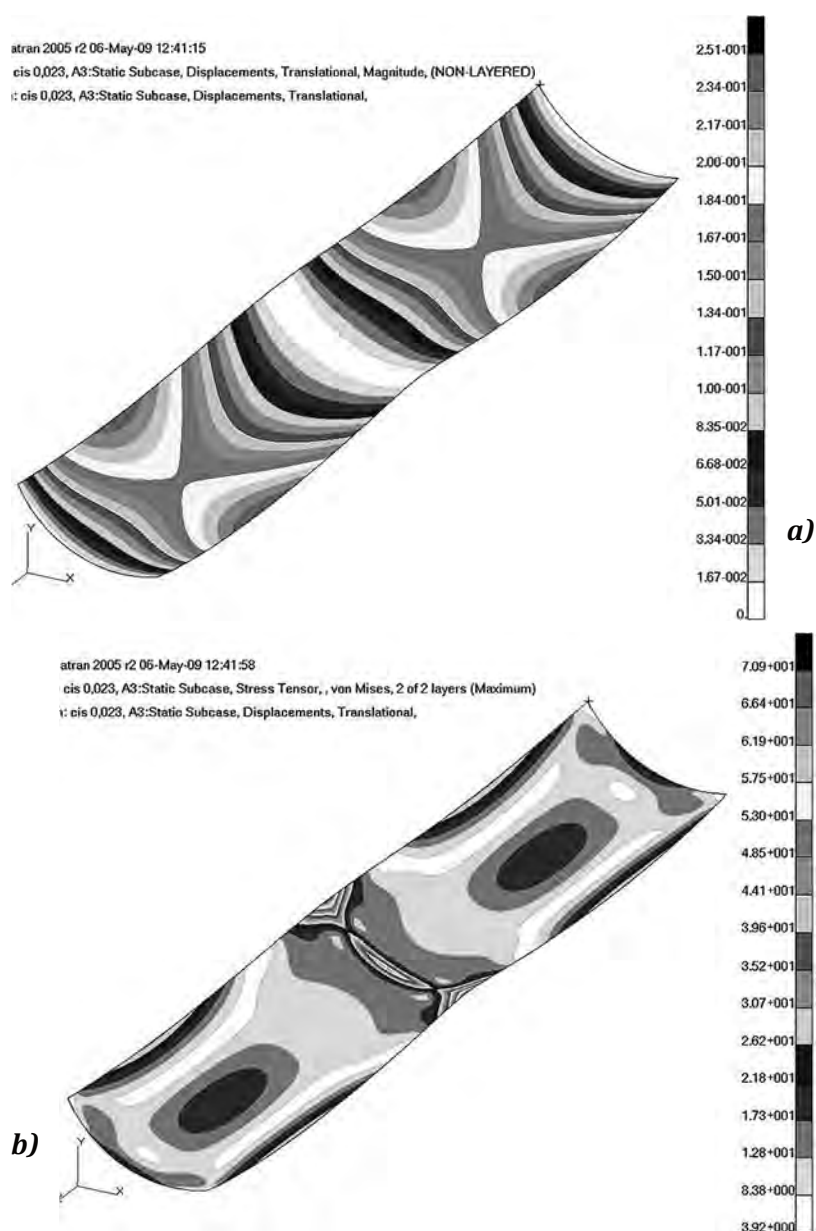


Rys. 12. Wyniki obliczeń modelu tarczy stalowej. Przemieszczenia wypadkowe - a i naprężenia zredukowane - b

III. Łopátka wirnika

Tab. 6. Największe przemieszczenia całkowite i naprężenia w modelu łopátki o strukturze jednorodnej

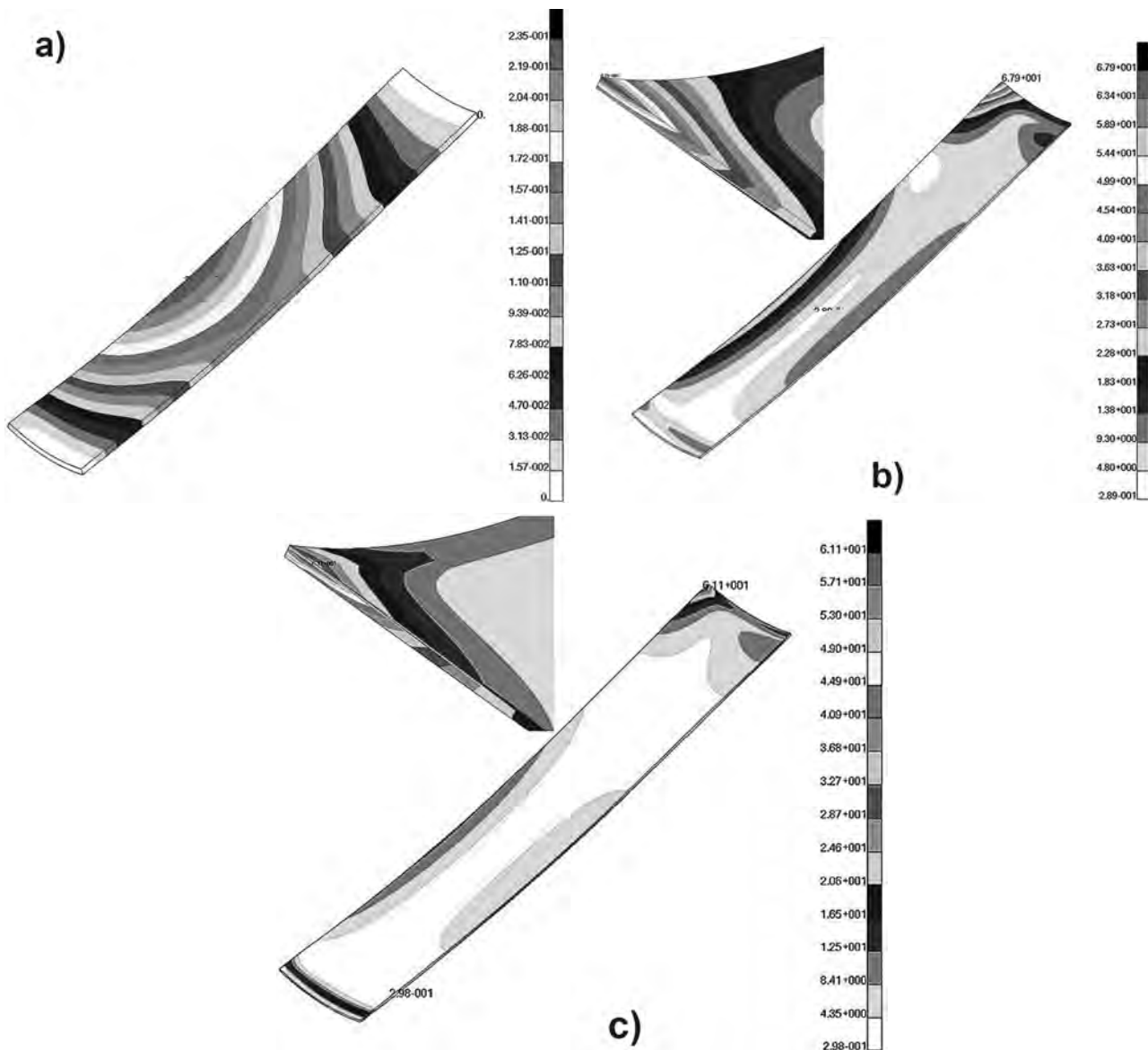
Nr modelu	Grubość łopátki	Materiał	$u_{\text{całkowite}}$	$\sigma_{\text{red HMH}}$
	[mm]		[mm]	[MPa]
1a	10	stal	0,25	70,9
1b		duraluminium	0,40	42,9
1c		kompozyt szklano-epoksydowy	1,20	43,7
2	4	stal	0,50	143,0



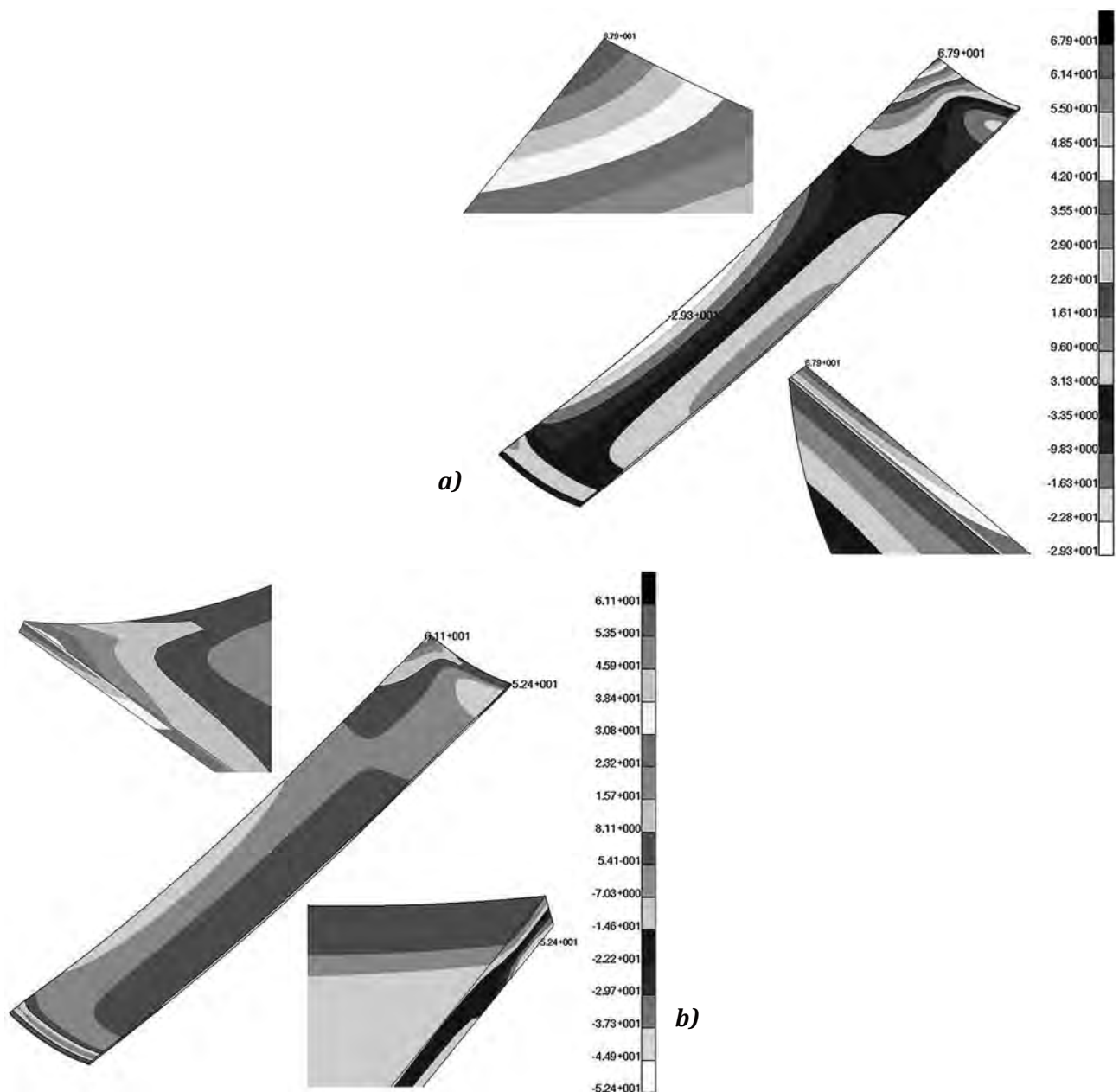
Rys. 13. Model 1a. Przemieszczenia wypadkowe - a i naprężenia zredukowane - b

Tab. 7. Największe przemieszczenia całkowite i naprężenia w modelu łopatki warstwowej

Warstwa			wewnętrzna	zewnątrzna
materiał			stal	
grubość		[mm]	2	2
$u_{\text{całkowite}}$			0,24	
$\sigma_{\text{red HMH}}$		[MPa]	70,9	42,9
σ_z	rozciąganie		67,9	61,1
	ściskanie		-29,3	52,4



Rys. 14. Model łopatki warstwowej. Przemieszczenia wypadkowe - a; naprężenia zredukowane w warstwie wewnętrznej - b i w warstwie zewnętrznej - c



Rys. 15. Model łopatki warstwowej. Naprężenia σ_z w warstwie wewnętrznej - a i w warstwie zewnętrznej - b

PODSUMOWANIE

1. Korpusy turbiny w obu rozpatrywanych wersjach, płytowej i cienkościennej, mają wystarczającą wytrzymałość statyczną. Konstrukcja cienkościenna jest lepsza, ze względu na mniejsze przemieszczenia struktury i zwartą konstrukcję.
2. Zastosowanie betonu do budowy korpusu nie budzi zastrzeżeń z punktu widzenia wytrzymałości statycznej i jest uzasadnione kosztowo. Konieczne jest jednak wykonanie próby zmęczeniowej, w oparciu o opracowany w I.Lot. program badań -[2], której wynik mógłby potwierdzić odporność konstrukcji na generowane przez wirnik obciążenia zmienne.
3. Tarcza turbiny, zarówno wykonana ze stali nierdzewnej jak i z kompozytu szklano-epoksydowego, spełnia wymagania wytrzymałościowe. Jednak wariant stalowy zapewnia lepsze warunki współpracy z korpusem, gdyż ugięcia segmentów między łopatkami są kilkakrotnie mniejsze.

4. Najlepszym materiałem, spośród tych, które rozpatrywano w zastosowaniu do łopatki turbiny, jest stal St3s. Z uwagi na największą sztywność daje, przy tej samej grubości, najmniejsze ugięcie krawędzi łopatki między podporami. Pozwala także na wykonanie jej z blachy o grubości 4 mm, co jest ważne dla zmniejszenia oporów przepływu.
5. Wykonanie łopatki z dwóch blach stalowych o grubości 2 mm każda, rozdzielonych warstwą gumy, również grubości 2 mm, znacznie zmniejszyło maksymalne ugięcia łopatki i wartości naprężeń w porównaniu z łopatką o grubości 4 mm. Jednakże to rozwiązanie nie zostało przewidziane do realizacji, z uwagi na duże trudności technologiczne wykonania.

LITERATURA

- [1] **Hoffman M.:** *Małe elektrownie wodne – poradnik*. Wyd. Nabba, Warszawa 1992 r.
- [2] *Dobór i badania materiałów pod kątem stabilności własności użytkowych dla podzespołów turbiny wodnej*. Opracowanie I.Lot. Nr arch. 178 / BP1 - SR/09.
- [3] *Analiza przepływu przez model turbiny wodnej typu Michell-Banki*. Opracowanie I.Lot. Nr arch. 12/BA-A2/08/P.
- [4] **Szot A.:** *Program próby zmęczeniowej korpusu turbiny wodnej typu Michell-Banki o mocy 7,25 kW*. Opracowanie I. Lot. Nr arch. 170/BP1-PP/09.
- [5] *Norma PN-88/H-84020: St3s. Stal niestopowa konstrukcyjna ogólnego przeznaczenia*.
- [6] **Skubaczewskij G. S.:** *Awiacionnyje gazoturbinyje dwigatieli. Konstrukcija i rascziet dietaliej*. Moskwa 1955 r.
- [7] *Stale nierdzewne, kwasoodporne. Podstawowe gatunki*. Katalog ofertowy firmy ITALINOX Polska.
- [8] *Katalog EKONIT „Płyty elektroizolacyjne i konstrukcyjne. Płyty szklano-epoksydowe.”*
- [9] *Norma PN-EN-197 -1: Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- [10] *Norma PN-B-06265: 2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206 -1: 2003 Beton – część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.

A. Szot

STRENGTH FEM ANALYSIS OF MICHELL-BANKI WATER TURBINE ELEMENTS

Abstract

The paper presents strength calculations of the water turbine type Michell-Banki with output power 7,25 kW, calculations performed by using the FEM method. The case of turbine was analysed as well as the rotor disc and the rotor blade in different constructional variants, using materials as glass-epoxy composite, pine plywood, steel, duralumin and concrete. Turbine structural design and calculations were created in frameworks of the Purposeful Project – the Contract No. 03996/C. 2R-6/2007 from MNiSzW.