

prof. dr hab. inż. Janusz Mielniczuk
Politechnika Poznańska
Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”
dr inż. Marek Malinowski
Uniwersytet Zielonogórski
mgr inż. Paweł Kuligowski
Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”

Elementy powierzchniowe o strukturze porowatej w konstrukcji dachów pojazdów szynowych

Na przykładzie konstrukcji dachu omówiono możliwości zastosowania w budowie pojazdów szynowych elementów powierzchniowych o strukturze porowatej. Przedstawiono założenia modelu takich elementów. Przeprowadzono analizę wytrzymałościową fragmentu dachu z poszyciem o tradycyjnej konstrukcji stalowej i o strukturze porowatej oraz zestawiono porównanie wyników.

1. Wprowadzenie

Praca stanowi kontynuację wcześniej podjętych i opublikowanych badań [1].

Elementy konstrukcji dachów mogą być jednym z wielu możliwych obszarów zastosowań materiałów o strukturze porowatej w budowie taboru szynowego. Mogą one zastąpić tradycyjne konstrukcje stalowe.

W obecnie eksploatowanych pojazdach szynowych elementy dachowe posiadają najczęściej konstrukcję szkieletową, tzn. szkielet stalowy pokryty poszyciem w postaci blachy.

Przyjęcie elementów powierzchniowych o strukturze porowatej prowadzi do zmian termomechanicznych konstrukcji dachu.

W artykule porównano pod względem ugięciowym i naprężeniowym zachowanie się konstrukcji dachowych z poszyciem stalowym jednorodnym oraz o strukturze porowatej.

Obciążenia konstrukcji dachowych uzależnione są od funkcji jakie pełnią. Część z nich bowiem pełni rolę wyłącznie pokryw, podczas gdy inne mogą stanowić część konstrukcji nośnej pojazdu. W pierwszym przypadku o wytrzymałości decydują wyłącznie siły przykładane z zewnątrz, natomiast w drugim dodatkowo dochodzą obciążenia wewnętrzne pochodzące od współpracy z pozostałą częścią konstrukcji. W prezentowanej analizie rozpatrzono tylko pierwszy przypadek.

Obciążenie próbne dachów przewidziane w przepisach kolejowych (UIC, ERRI, normach europejskich itp.) ogranicza się jedynie do przyłożenia siły pochodzącej od poruszającego się po dachu człowieka (około 1kN). Jednak niebagatelne znaczenie dla wytrzymałości konstrukcji dachu ma obciążenie pochodzące od zalegającego na nim podczas postoju śniegu. Z wstępnych obliczeń [2] wynika, że przy założeniu obciążenia jednostkowego równomiernie rozłożonego na poziomie np. $q=2\text{kN/m}^2$ ($\sim 200\text{kG/m}^2$),

odkształcenia konstrukcji, zwłaszcza w kierunku pionowym, są zdecydowanie (nawet pięciokrotnie) większe niż od obciążenia człowiekiem. Wobec powyższego w analizie wytrzymałości dachu uwzględniono jedynie obciążenie pochodzące od śniegu.

2. Numeryczna analiza ugięć i naprężeń

Analizie poddano fragment konstrukcji dachu wagonu pasażerskiego składającego się z pięciu krokwi wzmocnionych poprzecznymi ściągami, połączonych na swych końcach z podłużnicą dachową, będącą jednocześnie elementem łączącym dach ze ścianą boczną wagonu. Krokwie wykonane są z zettowników giętych z blachy o grubości 3mm, a ściągi w postaci kątowników z blachy 2mm. Podłużnica dachowa wykonana jest z blachy 1.5mm. Całość pokryta jest blachą ryflowaną o grubości 1.5mm.

Elementem, na który zwrócono szczególną uwagę, jest blacha poszyciowa. Zamodelowano ją tak, aby można było jej przypisać własności zarówno jako elementowi stalowemu jednorodnemu, jak i elementowi o strukturze porowatej. Szczegóły przedstawiono poniżej.

Własności materiałowe, zmienne na grubości powłoki w przekroju poprzecznym, zostały zdyskretyzowane za pomocą 41 warstw o stałej grubości t_1 oraz o stałych wskaźnikach mechanicznych. Poszczególne warstwy miały stałe materiałowe obliczone wg zależności przedstawionych w pracy [3]:

$$\begin{aligned} E(z) &= E_1 [1 - e_0 \cos(\pi \zeta)] \\ G(z) &= G_1 [1 - e_0 \cos(\pi \zeta)] \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$$e_0 = 1 - \frac{E_0}{E_1} = 1 - \frac{G_0}{G_1} - \text{współczynnik}$$

porowatości powłoki, $G_j = \frac{E_j}{2(1+\nu)}$, $j = 0, 1$,
 E_0, G_0, E_1, G_1 - moduły sprężystości dla $\zeta = 0$
 i $\zeta = \pm \frac{1}{2}$,
 $\zeta = \frac{z}{t}$ - bezwymiarowa współrzędna,
 ν - liczba Poissona.

Liczbę Poissona przyjęto jednakową dla wszystkich warstw i była ona równa 0,3. Całkowita grubość porowatej powłoki t_p w badaniach MES-em (Metoda Elementów Skończonych) wynosi:

$$t_p = \sum_i^N t_i \quad (2)$$

gdzie:

N - suma wszystkich warstw ($N=41$),

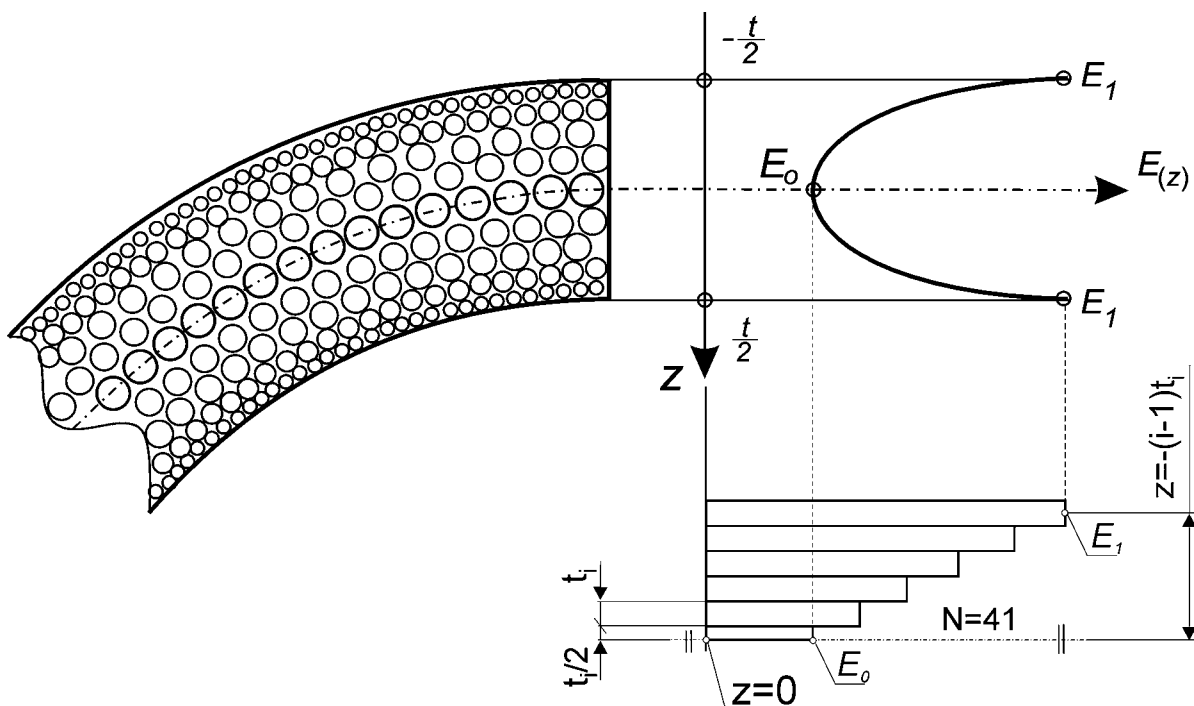
i - numer warstwy.

Współrzędną z_i , dla której zdefiniowano stałe materiałowe dla i -tej warstwy, obliczono na podstawie wzoru:

$$z_i = \frac{i-1}{2} t_i \quad (3)$$

Zagadnienie ugięć panela walcowego o strukturze porowatej było przedmiotem badań [4] i w pracy tej przedstawiono wyniki badań dla modelu analitycznego i dyskretnego.

Schemat porowatej powłoki i sposób dyskretyzacji stałych materiałowych przedstawiono na rys. 1.



Rys.1 Schemat porowatej powłoki i aproksymacja prostokątna stałych materiałowych

Model dyskretny fragmentu dachu przedstawiono na rys.2. Badania wykonano MES-em za pomocą programu ANSYS. W modelu obliczeniowym uwzględniono symetrię płaszczyznową oraz cykliczną, występującą w rzeczywistej konstrukcji dachu wagonu. W miejscu podparcia modelu na ścianie bocznej wagonu umożliwiono przesunięcie w kierunku poprzecznym. Krawędzie krokwi kończące model utwierdzono na przemieszczenie w kierunku wzdłużnym i obrót względem osi poprzecznej. Obciążenie śniegiem przyłożono na górnej części dachu do wysokości położenia ściaгу.

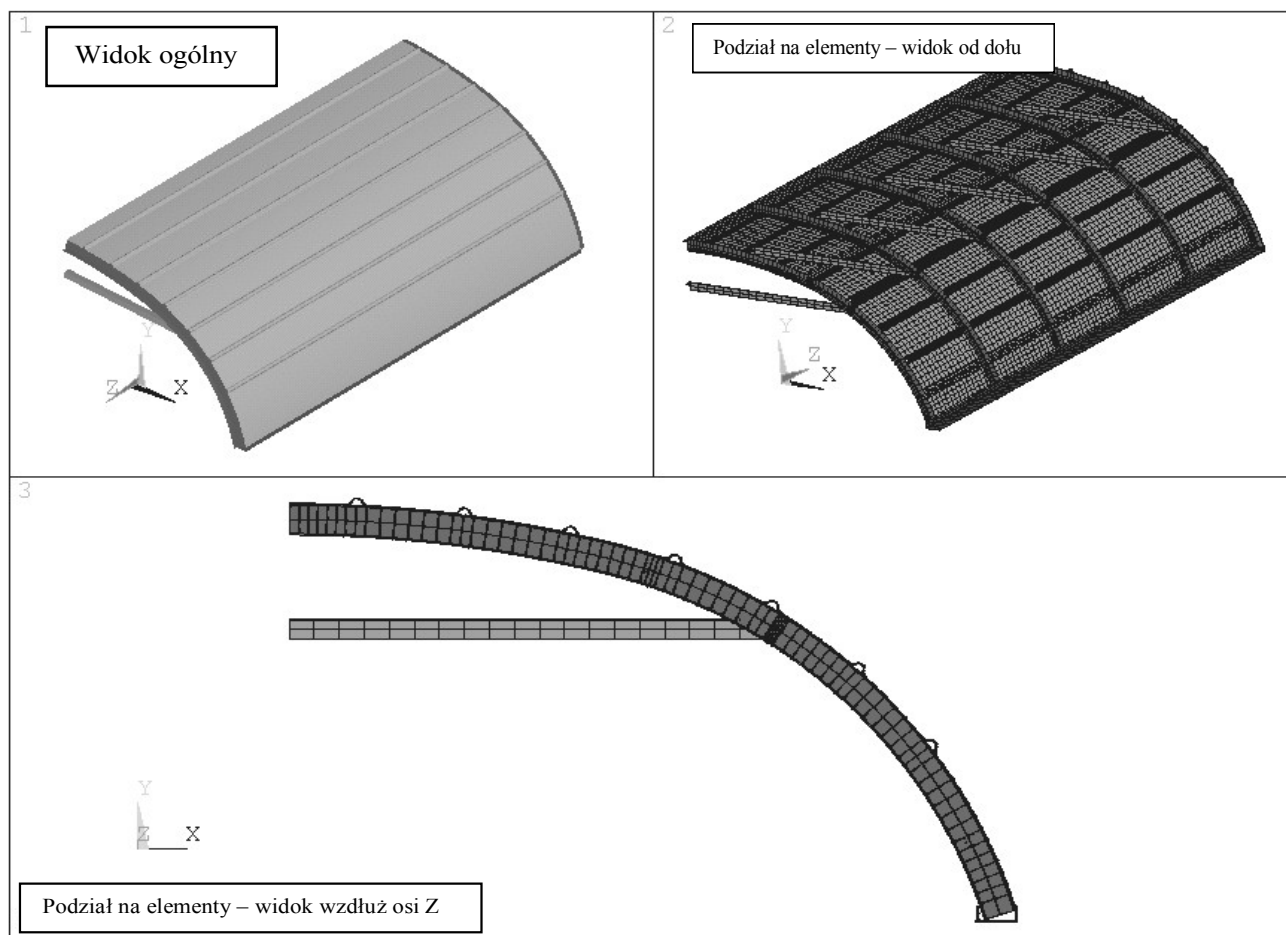
Do obliczeń zastosowano element powłokowy wielowarstwowy SHELL99 oraz element belkowy BEAM188 o przekrojach poprzecznych odpowiadających kształtownikom usztywniającym poszycie dachu wagonu. Model obliczeniowy zawierał 12981 elementów, w tym 11900 elementów typu SHELL oraz 1081 elementów typu BEAM. Cały model posiadał 72470 aktywnych stopni swobody.

Wyniki badań wykonano dla następujących danych przyjętych dla powłoki walcowej: $E_1=0,205\text{GPa}$; $\nu=0,3$; $e_0=0,0; 0,45; 0,90; 0,99$.

3. Omówienie wyników analizy

Na rys.3 i 4 przedstawiono w celach orientacyjnych przykładowy rozkład przemieszczeń poziomych i pionowych powstający w modelu dachu pod obciążeniem śniegiem. Szczegółowe wyniki zestawiono w sposób tabelaryczny.

W tabeli 1 zamieszczono wyniki obliczeń numerycznych maksymalnego bezwymiarowego ugięcia



Rys.2 Model dyskretny fragmentu dachu wagonu

poziomego u_x/t , pionowego u_y/t , stosunku maksymalnych naprężeń zredukowanych dla powłoki klasycznej i o strukturze porowatej $\sigma_{red}/\sigma_{redp}$ oraz stosunku ich mas m/m_p (m_p -masa powłoki o strukturze porowatej).

Konstrukcja dachu o strukturze porowatej jest wrażliwa na ugięcia poziome i w porównaniu z klasyczną konstrukcją jej maksymalne ugięcie poziome jest około 1,42 razy większe niż w przypadku dachu klasycznego, dla współczynnika porowatości $e_0=0,45$. W przypadku większej porowatości struktury np. $e_0=0,99$ iloraz ten jest większy i dochodzi do wartości 2,80.

Podobnie jest w przypadku ugięć pionowych. Dla współczynnika porowatości $e_0=0,45$ maksymalne ugięcie pionowe jest 1,34 razy większe niż w przypadku powłoki o strukturze jednorodnej i 2,39 razy większe dla $e_0=0,99$.

Istotne z wytrzymałościowego punktu widzenia są naprężenia zredukowane. Z tabeli 1 wynika, że dla całej rodziny powłok porowatych maksymalne naprężenia zredukowane σ_{redp} są mniejsze niż w przypadku konstrukcji klasycznej (maksymalnie do 2,3% dla porowatości $e_0=0,99$).

Bezwymiarowe ugięcie poziome, pionowe oraz stosunek naprężeń zredukowanych i mas ($t=t_p$)

Tabela 1

L.p.	Współczynnik porowatości	u_x/t	u_y/t	$\sigma_{red}/\sigma_{redp}$	m/m_p
1	$e_0 = 0,0$	0,109	0,757	1,0	1,0
2	$e_0 = 0,45$	0,155	1,011	1,008	1,401
3	$e_0 = 0,90$	0,263	1,589	1,020	2,342
4	$e_0 = 0,99$	0,305	1,808	1,023	2,705

Stosunek grubości powłok oraz ich mas przy jednakowym ugięciu pionowym

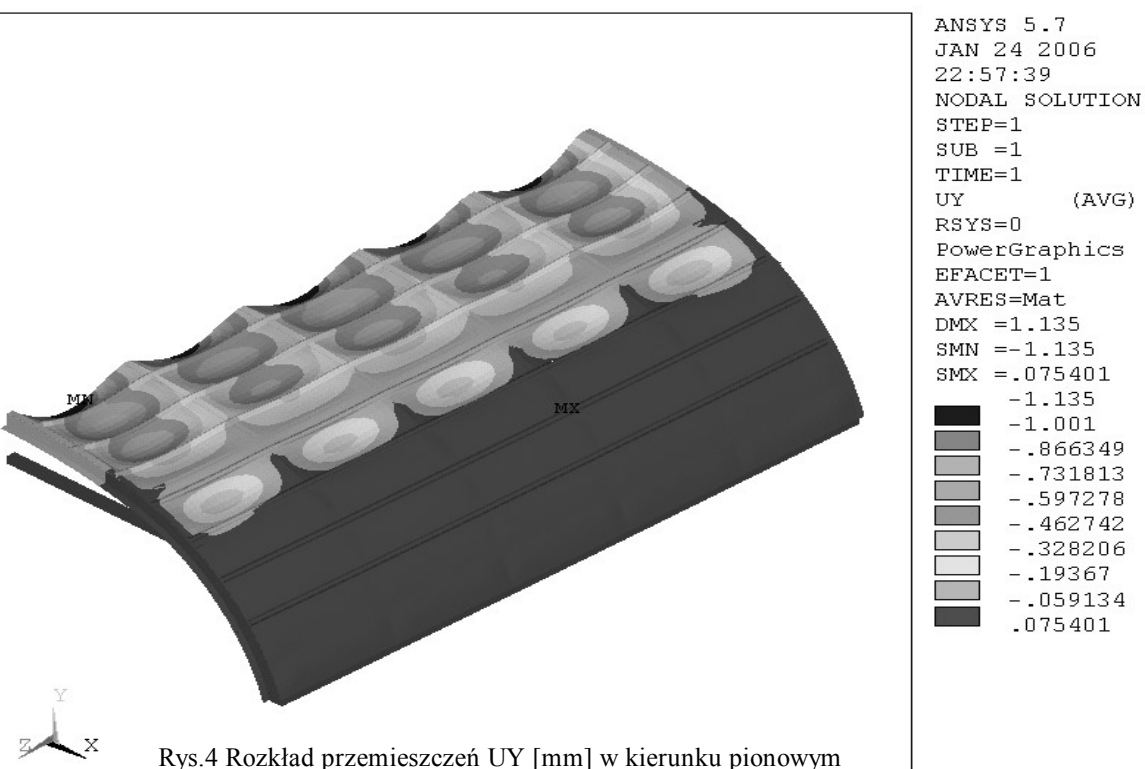
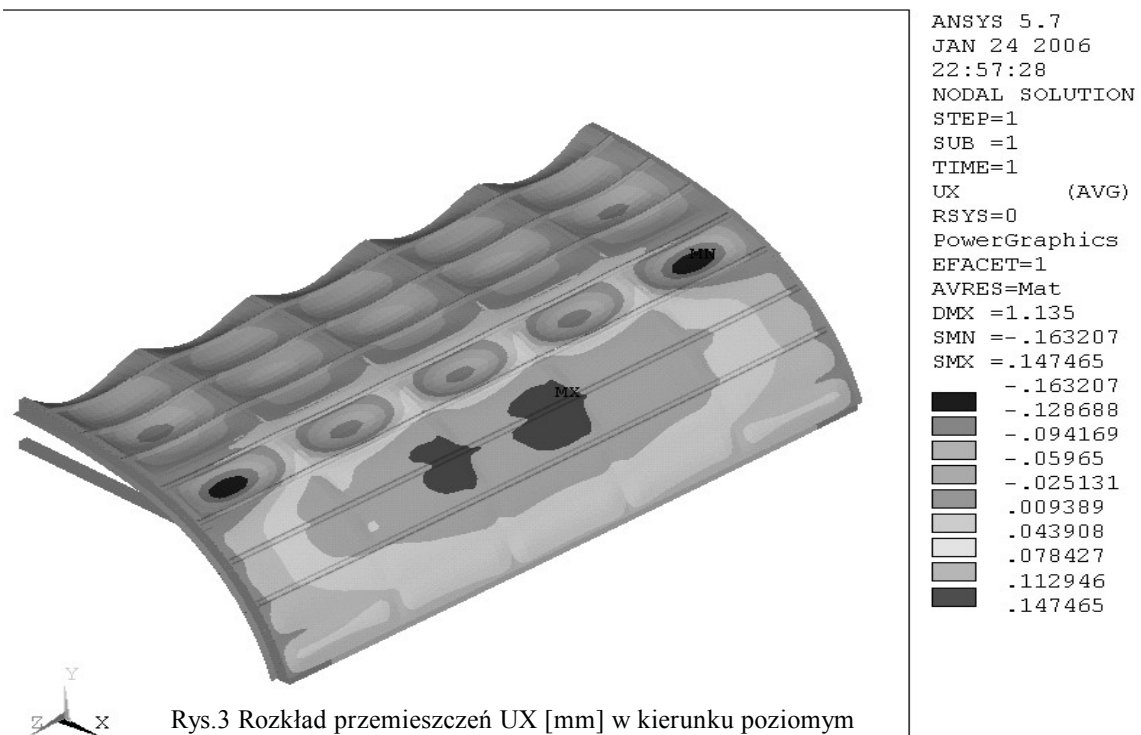
Tabela 2

L.p.	Współczynnik porowatości	t/t_p	t_p/t	m/m_p	m_p/m
1	$e_0 = 0,0$	1,0	1,0	1,0	1,0
2	$e_0 = 0,45$	0,848	1,179	1,191	0,840
3	$e_0 = 0,90$	0,658	1,520	1,539	0,650
4	$e_0 = 0,99$	0,613	1,631	1,667	0,599

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych stosunków grubości t i t_p (t_p – grubość powłoki o strukturze porowatej) oraz mas m i m_p dla rodziny powłok o strukturze porowatej o różnych współczynnikach porowatości oraz dla konstrukcji klasycznej. Badania przeprowadzono przy założeniu, że maksymalne ugięcie pionowe dachu ze strukturą porowatą jest równe ugięciu maksymalnemu konstrukcji z powłoką o strukturze jednorodnej

($t=1,5\text{mm}$). Porównanie grubości powłok oraz ich mas daje wyniki, interesujące z poznawczego punktu widzenia.

Wraz ze wzrostem współczynnika porowatości e_0 grubość powłoki porowatej w stosunku do grubości powłoki klasycznej rośnie (maksymalnie 1,631 razy dla $e_0=0,99$), a masa powłoki porowatej maleje (do około 60% masy powłoki klasycznej dla $e_0=0,99$). Daje to wymierne korzyści wynikające z masy całkowitej wagonu.



4. Wnioski

Z uzyskanych rezultatów wynika, że zastosowanie materiałów o strukturze porowatej na elementy powierzchniowe poszycia dachów pojazdów szynowych jest możliwe. Wymusza to zastosowanie nieco grubszej powłoki oraz pewnych zmian konstrukcyjnych szkieletu dachu (m.in. w celu spełnienia wymagań skrajni kinematycznej), ale pojawia się znaczący zysk na masie (mogący dochodzić nawet do 60%) co ma niebagatelne znaczenie zwłaszcza w przypadku długich wagonów jakimi są wagony pasażerskie. Zaproponowane rozwiązanie modelowe można by z powodzeniem zastosować w innych obszarach konstrukcji pojazdów szynowych. W pracy nie uwzględniono zjawisk termomechanicznych. Stosowanie materiałów porowatych znacznie zwiększa izolacyjność cieplną poszycia dachu, wykluczając konieczność montowania specjalnych warstw docieplających.

5. Literatura

- [1] Mielniczuk J., Malinowski M.: *Modele materiałów porowatych w projektowaniu konstrukcyjnych elementów powierzchniowych*, *Pojazdy Szynowe*, 3/2005.
- [2] Kuligowski P.: *Analiza odkształceń konstrukcji nośnej dachu wagonu pasażerskiego. Opracowanie OR-9010 (niepublikowane)*, Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR” Poznań, 2005.
- [3] Magnucki K., Stasiewicz P.: *Elastic bending of an isotropic porous beam*, *Int. Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 9(2), 2004.
- [4] Malinowski M., Magnucki K.: *Deflection of an isotropic porous cylindrical panel*, *Shell structures: theory and applications: proceedings of the 8th SSTA Conference*, ed. W. Pietraszkiewicz, C. Szymczak, London: Taylor & Francis, 2005.