

## AUTOREFERAT

### 1. Imię i Nazwisko

Jan Galicki

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania.

Magister inżynier, Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej, 1981 r.,  
Doktor nauk technicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej, 1991r.

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

1982–1991 asystent w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Politechniki Białostockiej  
1991–2006 adiunkt w Zakładzie Mechaniki Stosowanej a następnie w Katedrze  
Mechaniki I Informatyki Stosowanej Politechniki Białostockiej,  
2006–2009 starszy wykładowca w Katedrze Mechaniki I Informatyki Stosowanej  
Politechniki Białostockiej,  
2009–2011 adiunkt w Katedrze Mechaniki I Informatyki Stosowanej Politechniki  
Białostockiej,  
2011–2013 starszy wykładowca w Katedrze Mechaniki I Informatyki Stosowanej  
Politechniki Białostockiej.

### 4. Wskazanie osiągnięcia\* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.):

#### Znaczące osiągnięcia naukowe:

#### a) Tytuł osiągnięcia naukowego:

**„Nowa teoria opisu wytrzymałości anizotropowych materiałów niejednorodnych sformułowana na podstawie analizy mechanizmów niszczenia struktury drewna poddanego zewnętrznemu obciążeniu”.**

#### b) Osiągnięcie naukowe stanowi jednotematyczny cykl 5-ciu publikacji z lat 2005-2013.

**[H1]** Galicki Jan, Czech Michał, Tensile strength of softwood in LR orthotropy plane, *Mechanics of Materials*, 2005, 37, 677-686,

**[H2]** Galicki Jan, Application of density as a parameter in description of failure stress under uniaxial loading of softwood in LR orthotropy plane, *Archives of Mechanics*, 2007, 59, 21-38,

**[H3]** Galicki Jan, Application of the fields of objects formed on the basis of unit tensor objects to describe the tensile and compression failure stresses of pine wood in the principal orthotropy plane, *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46, 4298-4312,

[H4] Galicki Jan, Czech Michał, A new approach to formulate the general strength theories for anisotropic discontinuous materials. Part A: The experimental base for a new approach to formulate the general strength theories for anisotropic materials on the basis of wood, Applied Mathematical Modelling, 2013, 37, 815-827,

[H5] Galicki Jan, A new approach to formulate the general strength theories for anisotropic discontinuous materials. Part B: General form of polynomial to describe the strength of anisotropic discontinuous materials, Applied Mathematical Modelling, 2013, 37, 828-850,

- c) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Moją dotychczasową działalność naukową można podzielić na dwa okresy. W pierwszym okresie działalności zajmowałem się opisami zmęczenia cieplnego metali. Opisy te były rozwinięciem znanych kryteriów zniszczenia przy zmęczeniu cieplnym z jednoosiowego stanu naprężenia wywołanego cykliczną zmianą temperatury na płaskie stany naprężeń. W badaniach doświadczalnych wykorzystałem stanowisko Coffina specjalnie zmodyfikowane do badań zmęczenia cieplnego na próbkach rurkowych, które pozwalało na nałożenie stałego naprężenia stycznego na naprężenia normalne wynikające z cyklicznych zmian temperatury. Wynikiem tych badań był między innymi doktorat pt. „Badanie zmęczenia cieplnego w różnych jednorodnych stanach naprężeń” i publikacja [1] z 1995 roku.

W drugim okresie działalności naukowej zajmuję się opisem wytrzymałości materiałów anizotropowych. Inspirację do zajęcia się tym tematem znalazłem w pracy Goodmana i Bodiga [2] z 1970 r., gdzie autorzy na podstawie badań eksperymentalnych wprost stwierdzają, że związki konstytutywne (tj. tensorowe wywodzące się z mechaniki ośrodków ciągłych) powinny być udoskonalone w celu poprawnego opisu zachowania się drewna w stanie sprężystym. Skoro, jeśli z doświadczenia wynika, że związki te niepoprawnie opisują stan sprężysty drewna tym bardziej wątpliwe staje się zastosowanie tensorów naprężeń do opisu jego wytrzymałości. Wskazuje na to niezwykle bogata literatura z zakresu badań wytrzymałościowych drewna. Również na podstawie literatury spostrzeżenie to niewątpliwie można rozciągnąć na inne materiały anizotropowe.

Pierwszy ogólny opis wytrzymałości, tj. dla dowolnie zorientowanego kartezjańskiego układu osi (nazywanego dalej układem strukturalnym) w wyniku jego obrotu w

przestrzeni, podał Mises w pracy [3] z 1913 r. opisując stan plastyczny materiału izotropowego. Opis ten, uwzględniający tezę podaną przez Hubera w 1904 r. w pracy [4] o braku wpływu ciśnienia hydrostatycznego na uplastycznienie materiału, jest funkcją drugiego niezmiennika dewiatora naprężeń. Należy przy tym podkreślić fizyczny aspekt tego opisu wyrażony poprzez krytyczną wartość energii odkształcenia postaciowego (Hencky [5], 1924). Znaczenie tego aspektu, w ujęciu zaproponowanym przez Hencky'ego, maleje w przypadku materiałów izotropowych o różnych wartościach naprężeń niszczących przy ściskaniu i rozciąganiu (przy występowaniu tzw. SD efektu). Spowodowane jest to poprzez wprowadzenie do wytrzymałościowych bądź niszczących kryteriów wytrzymałościowych liniowych wyrazów naprężeń normalnych. W przypadku materiałów izotropowych pierwsze takie rozwiązanie sformułowane zostało przez Misesa i Schleichera [6] w 1926 r., gdzie autorzy wprowadzili do opisu wytrzymałościowego pierwszy niezmiennik tensora naprężeń. Tym samym taki opis zatracą sens fizyczny przesuwając go w stronę opisów matematycznych. Istotą opisów w powyższych ujęciach jest otrzymanie funkcji wielomianowej naprężeń ze stałymi współczynnikami, gdzie naprężenia są składowymi tensora naprężeń. Poprzez wprowadzanie do tych rozwiązań, bądź na tej zasadzie tworzonych innych rozwiązań, parametrów opisujących zachowanie się materiałów podczas obciążania opisy te przyjmują fenomenologiczny charakter. Przykładowo można tu podać dwuparametrowe kryterium Drukera-Pragera [7] z 1952 r. W szczególnych przypadkach wielomiany dają opis w postaci przecinających się płaszczyzn, jak np. kryterium Tresca czy Coulomba-Mohra zapisane w postaci ogólnej.

W przypadku materiałów anizotropowych ogólne kryteria wytrzymałościowe zazwyczaj budowane są na bazie już istniejących rozwiązań dla materiałów izotropowych. Przykładem tego jest rozbudowa przez Hilla ([8], 1948) izotropowego kryterium Misesa do postaci opisującej wytrzymałość materiałów ortotropowych poprzez wprowadzenie do opisu współczynników anizotropii materiału przy zachowaniu zależności tensorowych pomiędzy naprężeniami. Pozwoliło to na uzyskanie w płaszczyźnie dewiatorowej elipsy ze środkiem wyznaczonym przez oś hydrostatycznego ściskania. W przypadku materiałów anizotropowych z efektem SD, ogólne kryteria wytrzymałościowe formułowane są jak poprzednio na bazie kryteriów opracowanych dla ciał izotropowych, przykładowo Mises-Schlichera przez Cazacu i Cristescu ([9], 1999) do opisu transwersalnie izotropowych skał. Również SD efekt może być osiągnięty poprzez modyfikację kryteriów dla anizotropowych materiałów bez SD efektu np. ortotropowego kryterium Hilla przez Hoffmana ([10], 1967).

Wszystkie wymienione kryteria dla ciał anizotropowych opisywane są w zasadniczym układzie współrzędnych, który pokrywa się z głównymi osiami anizotropii materiału. W innym położeniu układu współrzędnych opis wytrzymałości materiału uzyskiwany jest poprzez transformację składowych tensora naprężeń z tego układu do układu zasadniczego. Jednakże bardziej użytecznymi wydają się być opisy przedstawione w postaci wielomianów tensorowych. Pozwalają bowiem one na bieżące śledzenie powierzchni czy też hiperpowierzchni zniszczenia bądź wyężenia materiału w trakcie obrotu układu strukturalnego względem układu zasadniczego pokrywającego się z głównymi osiami anizotropii materiału. Możliwe to jest dlatego, że w wielomianach tych transformacji podlegają współczynniki będące składowymi symetrycznych tensorów parzystych rzędów. Jednocześnie naprężenia zmieniają się wówczas zgodnie z prawem transformacji tensora naprężeń.

Pierwszymi którzy wprowadzili wielomian tensorowy typu potęgowego, o malejących potęgach wraz ze wzrostem rzędu wyrazów, do opisu wytrzymałościowego materiałów anizotropowych byli Goldenblat i Kopnow ([11], 1965). Malmajster [12] w 1966 r. zaproponowała inną postać wielomianu przez pozbycie się malejących się potęg z poprzedniego wielomianu. Ograniczając liczbę wyrazów wielomianu można tworzyć ogólne opisy wytrzymałości ciał anizotropowych (przykładowo Tsai i Wu [13] – 1971).

Wszystkie powyższe kryteria mają wspólną cechę, a mianowicie są tworzone na bazie symetrycznych tensorów parzystych rzędów bądź ich algebry. Skutkiem tego jest wspólna właściwość ogólnych kryteriów wytrzymałościowych opisujących różne materiały anizotropowe a mianowicie naprężenia są związane ze sobą zależnościami tensorowymi. W przypadku materiałów jednorodnych podejście takie wydaje się jak najbardziej uzasadnione. Związane to jest z tym, że o wytrzymałości obciążonego elementu decyduje wytrzymałość określonego jego punktu z przypisanym do niego tensorem naprężeń. Punkt ten wybierany jest spośród pola tensorowego naprężeń w obrębie rozpatrywanego elementu które jest powiązane z polem odkształceń związkami Voigta przy spełnieniu warunków nierozdzielności de Saint-Venanta. Charakterystyczną cechą tych materiałów jest możliwość uzyskania przy odpowiednim ich obciążeniu jednorodnego stanu odkształcenia określonego przez związki Cauchy [14] z 1827 r., a tym samym uzyskania stałego pola tensorowego naprężeń w skończonej ich objętości. Wobec tego wyężeniowe lub niszczące kryteria wytrzymałościowe w przypadku materiałów jednorodnych odniesione do konkretnych elementów, które opisują wytrzymałość w punkcie mogą być weryfikowane na podstawie badań w których

uzyskuje się jednorodne stany naprężeń. W tych bowiem przypadkach naprężenie zdefiniowane jako stosunek siły przypadającej na skończoną powierzchnię przekroju jest równe naprężeniom zdefiniowanym przez Cauchy a więc z naprężeniami w punkcie obciążonego jednorodnego materiału.

Odmierna sytuacja występuje w przypadku anizotropowych materiałów niejednorodnych i niejednorodnych a zarazem nieciągłych. Te pierwsze najczęściej pod wzrastającym obciążeniem stają się również nieciągłe (np. kompozyty włókienne). W tych przypadkach zastosowanie obciążeń, które dla materiałów jednorodnych dają jednorodny stan naprężeń (stałe pole tensorowe naprężeń), generuje w strukturze tych materiałów niejednorodny stan naprężeń (zmienne pole tensorowe naprężeń). Wówczas zniszczenie struktury zachodzi poprzez jej uszkodzenia w wielu jej miejscach. Stąd też proces niszczenia struktury rozwija się w objętości obciążonego materiału do momentu kiedy pole naprężeń przy obciążeniu granicznym całkowicie ją zniszczy. Zatem opis wytrzymałości takich materiałów nie można przeprowadzić na podstawie naprężenia w punkcie rozpatrywanego materiału a pól naprężeń wygenerowanych w trakcie procesu niszczenia ich struktury w momencie kiedy ulega ona globalnemu zniszczeniu. Logicznym następstwem tego jest przyjęcie, że wytrzymałość niejednorodnego materiału odniesiona powinna być do skończonej objętości materiału a nie do jego punktu. Oczywistym jest, że dla danego pola naprężeń na granicy tej objętości jest przyporządkowane ściśle określone pole tensorowe naprężeń wewnątrz niej samej. W przypadku rozpatrywania zagadnienia w kartezjańskim układzie współrzędnych wygodnie jest operować objętością w postaci sześcianu względnie prostopadłościanu o podstawie prostokąta i skończonych wymiarach. Jeżeli zatem w tego typu zagadnieniu operujemy naprężeniami obliczonymi jako stosunki sił do skończonych powierzchni to są to naprężenia średnie z naprężeń ze wszystkich punktów rozpatrywanych przekrojów, które w rzeczywistości mogą występować jedynie tylko w niektórych ich punktach. Poza tym kierunek tych naprężeń zgodny jest z kierunkiem obciążenia, co w przypadku rzeczywistych materiałów anizotropowych nie jest spełnione dla poszczególnych punktów przekrojów.

**Zachodzi zatem pytanie czy te naprężenia można wykorzystywać do opisu wytrzymałości materiałów anizotropowych?**

Odpowiedź w tym przypadku jest twierdząca bowiem tak wyznaczone wartości tych naprężeń zmieniają się ciągle zarówno przy zmianie wzajemnych proporcji pomiędzy nimi jak też ich wartości zmieniają się wraz ze zmianą ich kierunków podczas obrotu

układu strukturalnego względem układu zasadniczego. Jest to związane z ciągle zmieniającym się polem tensorowym naprężeń w momencie globalnego zniszczenia struktury w jej skończonej objętości dla różnych proporcji pomiędzy naprężeniami średnimi oraz obrotu układu strukturalnego w przestrzeni względem struktury materiału.

**Skoro zaś nie są to naprężenia odniesione do punktu materiału należy zadać pytanie, czy naprężenia te transformują się zgodnie z prawem transformacji tensorów jak to jest czynione w dotychczasowych opisach wytrzymałościowych materiałów anizotropowych?**

Pytanie to jest bardzo istotne z uwagi na to, że w praktyce można się spotkać właściwie tylko z niejednorodnymi anizotropowymi materiałami zarówno wytworzonymi jak też i naturalnymi.

W fenomenologicznych opisach zniszczenia bądź wyężenia materiału niekoniecznie naprężenia dają się transformować jako składowe tensora naprężeń. Wynika to np. ze wzorów, podanych na przestrzeni XX w. przykładowo, przez Kollmanna [15] na wytrzymałość drewna przy ściskaniu i rozciąganiu, kryterium Hilla [16] dla blach obciążonych dwuosiowym stanem naprężeń normalnych czy też kryterium Pucka [17] sformułowanego dla jednokierunkowych kompozytów, chociaż w tym przypadku Puck wykorzystuje związki tensorowe przy transformacji naprężeń do płaszczyzny fizycznej zniszczenia kompozytu. Szczególnie interesujące odbicie fizyki zniszczenia kompozytu odnajdujemy w opisie matematycznym ostatniego kryterium gdzie powierzchnię zniszczenia tworzą kolejno powierzchnie przecinające się wzajemnie ze sobą.

Wychodząc z założenia, że nie można budować teorii opisu wytrzymałościowego anizotropowych materiałów niejednorodnych tylko w oparciu o przesłanki teoretyczne przeprowadzono badania eksperymentalne ze szczególnym zwróceniem uwagi na zachowania się struktury takiego materiału na skutek jej obciążania. Badania takie przeprowadzone zostały na drewnie sosnowym (*Pinus Silvestris*). W pracach [H1], [H3] i [H4] na podstawie mechanizmów zniszczenia struktury drewna sformułowane zostały założenia do opracowania nowej teorii wielomianu do opisu wytrzymałości niejednorodnych materiałów nieciągłych. Prace te oraz [H2] i [H5] przedstawiają drogę dojścia do nowej postaci wielomianu i w konsekwencji zaproponowania opisu w postaci ośmiu (w tym czterech niezależnych) hiperpowierzchni zniszczenia w sześciowymiarowej hiperprzestrzeni naprężeń średnich.

Drewno jest materiałem nieciągłym, odznacza się dużą anizotropią wytrzymałości co przy skomplikowanej strukturze opartej głównie na celulozie, hemicelulozie i ligninie podlega wielu mechanizmom zniszczenia. W pracach [H1], [H3] i [H4] zostały opisane mechanizmy zniszczenia struktury drewna sosnowego poddanego rozciąganiu (ściskaniu) w jednej z płaszczyzn ortotropii. Mechanizmy te są podobne do tych jakie występują dla innych gatunków drewna (np. świerku). Obserwacje niszczenia struktury drewna pod wpływem obciążenia zewnętrznego wykazują, że niszczenie struktury jest procesem przestrzennym tj. rozwój zniszczenia zapoczątkowywany jest w wielu miejscach jego struktury.

Z dotychczasowego stanu wiedzy wynika, że proces niszczenia przy rozciąganiu drewna wzdłuż tracheidów zapoczątkowywany jest poprzez uszkodzenia ścinanej lignino-hemicelulozowej osnowy w której łańcuchy hemicelulozy połączone są ze spiralnie ułożonymi mikrofibrilami celulozy – głównego budulca ścianek komórkowych drewna. Następnie drewno niszczone jest poprzez poprzeczne zerwania tracheidów co pociąga za sobą ścięcie warstw izotropowej ligniny pomiędzy tracheidami (ML – middle lamella) oraz komórek promieniowych, najczęściej w warstwach drewna wczesnego. Drewno niszczy się krucho, przy czym obszar w którym następuje rozdzielanie drewna jest znacznie większy dla drewna o większej gęstości niż dla drewna o gęstości mniejszej. Ponadto w badaniach została odnotowana zależność liniowa wytrzymałości drewna w stosunku do jego gęstości. Wraz ze wzrostem kąta obciążenia struktury w płaszczyźnie LR odmierzanego od kierunku L (L – kierunek wzdłuż tracheidów, R – kierunek wzdłuż komórek promieniowych) niszczenie struktury zachodzi w warstwach ML ligniny występującej pomiędzy tracheidami. W procesie niszczenia struktury zostają także ścięte bądź zerwane komórki promieniowe drewna. Proces rozdzielania drewna sosnowego przebiega w tych przypadkach w warstwie drewna wczesnego. Podobne mechanizmy zniszczenia obserwowane są dla rozciągania poprzecznego w płaszczyźnie LR ortotropii drewna. Z uzyskanych wartości obliczeniowych naprężeń w przeprowadzonych próbach dla poszczególnych kątów wynika, że gęstość drewna przy tym mechanizmie zniszczenia struktury nie ma wpływu na jego wytrzymałość.

Całkowicie odmienne mechanizmy niszczą strukturę drewna sosnowego pod działaniem obciążenia ściskającego. Podobnie jak przy rozciąganiu mechanizmy te są zazwyczaj takie same jak dla innych gatunków drewna w zakresie tych samych gęstości. Z obserwacji opisanych w literaturze wiadomo, że struktura drewna podczas ściskania wzdłuż tracheidów w pierwszej kolejności jest niszczona poprzez punktowe załamania

tracheidów. Załamania te przypisuje się występowaniu naturalnych inicjatorów tego procesu w postaci komórek promieniowych poprzecznie skierowanych do tracheidów. Następnie przy zwiększaniu obciążenia załamania te łącząc się ze sobą generują płaszczyznę załamania przebiegającą w całym przekroju niszczonej struktury. Badania doświadczalne przedstawione w pracy [H2] wykazują w tym przypadku wyraźną zależność liniową wytrzymałości względem gęstości badanego drewna. Przy wzrastającym kącie obciążenia odmierzanego od kierunku L w płaszczyźnie ortotropii drewna LR zmienia się mechanizm niszczenia struktury. Mechanizm ten dla mniejszych kątów polega na rozdzieleniu drewna poprzez ścięcie jego struktury pomiędzy komórkami wzdłużnymi w warstwie przejściowej ML. Ścięciu podlegają także w tych przypadkach komórki promieniowe drewna. Proces ten zachodzi w warstwie drewna wczesnego w sąsiedztwie warstwy drewna późnego. Przy wzroście kąta pod którym następuje ściskanie struktury względem kierunku L daje się również zaobserwować skupiska zniszczonych tracheidów przy wystąpieniu plastycznych przegubów i kruchego pęknięcia ścianek komórek wzdłużnych drewna sosnowego. W zakresie kątów bliskich ścisnaniu poprzecznemu drewno niszczy się poprzez zgniot struktury zapoczątkowany w komórkach wzdłużnych drewna wczesnego sąsiadujących z drewnem późnym który przebiega w kierunku przyrostów rocznych rozpatrywanego drzewa. Analogicznie jak w przypadku rozciągania badania wytrzymałościowe wykazały niezależność wytrzymałości drewna sosnowego przy tych mechanizmach zniszczenia od jego gęstości.

Obserwacje struktury niszczonych materiałów anizotropowych, w tym przedstawionych w pracach [H1], [H3] i [H4], wskazują na ścisły związek pomiędzy stanem naprężeń średnich i ich zorientowania względem struktury a mechanizmami zniszczenia zachodzących w strukturach tych materiałów. Zastosowanie tensorów do opisu naprężeń niszczących na podstawie tych obserwacji wskazuje na matematyczny charakter tego opisu (przykładowo składowa ze ściskania wzdłuż tracheidów jest wykorzystywana do opisu ściskania na innych kierunkach podczas gdy mechanizmy niszczenia są całkowicie różne i uzależnione są od właściwości innych komponentów struktury). Ponadto założenie występowania zależności tensorowych w przypadku naprężeń średnich dla niejednorodnych materiałów anizotropowych wydaje się być nieuprawnione ponieważ wymagałoby to spełnienia tej samej anizotropii w każdym punkcie rozpatrywanego materiału. Jest to niemożliwe ponieważ struktury anizotropowe tworzone są z komponentów zajmujących w przestrzeni określoną objętość, które nawet w przypadku kiedy nie różnią się rodzajem anizotropii a tylko parametrami opisującymi tą anizotropię to przy ich odpowiednim skomponowaniu względem siebie dają zupełnie inny



rodzaj anizotropii (np. jednokierunkowy kompozyt żywica – włókno szklane). Różne uporządkowanie poszczególnych struktur w rzeczywistym materiale powoduje wystąpienie różnych mechanizmów zniszczenia pod wpływem różnych pól tensorowych naprężeń którym mogą być przyporządkowane różne stany naprężeń średnich wraz z ich kierunkami względem struktury. Mechanizmy te niekoniecznie niszczą wszystkie struktury tworzące materiał anizotropowy. Ponadto mechanizmy niszczące struktury materiałów anizotropowych przy ściskaniu są różne od tych które niszczą je przy rozciąganiu. Wskazywałyoby to na inne opisy wytrzymałościowe przy trójosiowym ściskaniu w odniesieniu do trójosiowego rozciągania. W przypadku zależności tensorowych obowiązuje ten sam opis we wszystkich oktantach przestrzeni naprężeń normalnych. Powyższe spostrzeżenia zaprzeczają występowaniu zależności tensorowych pomiędzy sześcioma obliczeniowymi naprężeniami średnimi.

W kontekście zachowania się obciążonych rzeczywistych materiałów anizotropowych, na podstawie badań struktury drewna, opracowane zostały dwa założenia opisów wytrzymałościowych rzeczywistych materiałów anizotropowych:

- 1. wartości średnich naprężeń niszczących zmieniają się w sposób ciągły podczas obrotu strukturalnego układu współrzędnych względem struktury materiału,**
- 2. w opisie występuje nieciągłość pierwszego rzędu dla średnich naprężeń normalnych równych zero,**

które przedstawiono w pracy [H4]. Z drugiego warunku wynika brak zależności tensorowych pomiędzy sześcioma naprężeniami odniesionymi do skończonej objętości materiału anizotropowego.

Ze względu na silną zależność wytrzymałości drewna na rozciąganie i ściskanie wzdłuż tracheidów od masy właściwej, masa właściwa powinna być uwzględniona w opisie wytrzymałościowym drewna. Jednakże zastosowanie obecnie opracowanych ogólnych teorii, które bazują na zależnościach tensorowych do opisu wytrzymałości drewna na rozciąganie i ściskanie w płaszczyźnie LR ortotropii z uwzględnieniem masy właściwej, wydaje się niewłaściwe ze względu na otrzymanie niepoprawnych opisów. Dlatego w pracy [H1] został podany wyłącznie opis za pomocą krzywych empirycznych. Natomiast w pracy [H2] spośród trzech kryteriów: Misesa, Tsai-Wu i Ashkenazi do opisu wykorzystano kryterium Ashkenazi przy czym oddzielne to kryterium zastosowano do rozciągania i ściskania. Wybór tego kryterium uwarunkowany był tym, że operując

jednym ze współczynników oddzielnie dla rozciągania i ściskania przebieg krzywych wytrzymałości drewna wyznaczonych przez to kryterium dla maksymalnej i minimalnej gęstości drewna był najbardziej zbliżony do danych eksperymentalnych. W pracy tej również przedstawiono metodę wyznaczania stałych w oparciu o metodę najmniejszych kwadratów i danych doświadczalnych w postaci funkcji opisujących wytrzymałość na poszczególnych kierunkach w zależności od gęstości drewna. Tą samą metodą wyznaczono również zależności w postaci funkcji gęstości jako uzmiennionych stałych tego kryterium.

**Pomimo osobnych opisów na rozciąganie i ściskanie, co skutkuje brakiem zależności tensorowych naprężeń, uzyskano sporą rozbieżność opisu w stosunku do danych doświadczalnych (rys. 9 i 10 w pracy [H2]).**

W pracy [H5] przedstawiono nową teorię wielomianu wywodzącą się z wielomianu tensorowego przedstawionego przez Malmajster. Punktem wyjścia przedstawionej teorii jest analiza zachowania się rzeczywistego materiału anizotropowego poddanego zewnętrznemu obciążeniu i na tej podstawie zapisania tego w formie matematycznej. W tego typu zagadnieniach skalarna funkcja opisująca wytrzymałość materiału sprowadza się do funkcji uwikłanej której wartość w każdym jej punkcie jest równa jedności. Przy założeniu, że znana jest postać funkcji dla jednoosiowego stanu naprężeń (np. ściskania i rozciągania) warunek wytrzymałościowy dla dwuosowego stanu naprężeń ściskania i rozciągania uzyskano poprzez dodanie do tej funkcji drugiej funkcji opisującej wytrzymałość względem osi prostopadłej do poprzedniego kierunku oraz wyrazu odzwierciedlającego interakcję pomiędzy tymi naprężeniami. W skończonej objętości materiału występuje tensorowe pole naprężeń, które jest wprowadzone do funkcji zniszczenia w postaci średnich naprężeń jako zmiennych. Dlatego wprowadzenie do opisu wytrzymałości materiału w powyższy sposób dodatkowych naprężeń, przy określonych stosunkach pomiędzy naprężeniami, na poziomie gdy struktura w żadnym punkcie nie ulega uszkodzeniu (wartość funkcji jest mniejsza od zera) odzwierciedla tworzenie się zupełnie innego tensorowego pola naprężeń. Następnie zwiększenie obciążenia przy tym samym stosunku naprężeń średnich wywołuje w niejednorodnych materiałach anizotropowych powstawanie i rozwój uszkodzeń różnych od tych ze stanów opisywanych przez jednoosiowe naprężenia średnie i w konsekwencji w wymiarze globalnym prowadzi do zniszczenia jego struktury. Stąd można sądzić, że dla wytworzonego pola tensorowego naprężeń przypisany jest określony mechanizm niszczenia struktury materiału któremu przyporządkowane są

odpowiednie naprężenia średnie opisujące funkcję zniszczenia. Na podstawie powyższego wywodu nie ma podstaw do twierdzenia, że stan naprężeń tego pola jest taki sam, który wynikałby z sumowania tych pól toteż do warunku wytrzymałościowego wprowadza się wyraz interakcji pomiędzy naprężeniami średnimi. Dołączając w podobny sposób do opisu wytrzymałości kolejno po sobie następujące cztery pozostałe naprężenia otrzymujemy warunek wytrzymałościowy niejednorodnego materiału anizotropowego w sześciowymiarowej hiperprzestrzeni naprężeń.

W wielomianach tensorowych współczynniki są składowymi symetrycznych tensorów parzystych rzędów. Oznacza to, że przy transformacjach strukturalnego układu współrzędnych w których występuje zamiana trzech osi, równocześnie następuje zamiana składowych w trzelementowych zbiorach składowych przy czym ich wartości są zachowane na poszczególnych prostopadłych wzajemnie kierunkach niezależnie od zamiany osi układu. W niektórych przypadkach składowych mamy do czynienia ze zbiorami sześćoelementowymi. Oznacza to, że struktura tensorów używanych w opisach wytrzymałościowych jest zbudowana z pewnych obiektów. Struktura tych obiektów bazowana jest na dwóch obiektach podstawowych. Pierwszy obiekt składa się z dwóch wektorów: jednostkowego i wektora przeciwnego. Drugi obiekt to dwa prostopadle skierowane do siebie wektory jednostkowe. Pierwszy obiekt przypisany jest do naprężeń rozciągających i ściskających, drugi zaś do naprężeń stycznych. Wszelkie kombinacje związane z pierwszym, pierwszym i drugim oraz drugim obiektem przy których jednostkowe wektory pokrywają się z sobą lub są do siebie prostopadłe tworzą obiekty pochodne. Tak zdefiniowane obiekty można ulokować w kartezjańskim układzie współrzędnych na jeden, trzy lub sześć sposobów zależnie od rozpatrywanego obiektu. Tak wbudowane obiekty w strukturalny układ współrzędnych stanowią jednostkowe obiekty symetrycznych tensorów parzystych rzędów. Wartości tych obiektów są funkcjami orientacji układu współrzędnych względem struktury materiału anizotropowego w trzywymiarowej przestrzeni i dokładnie są one zdefiniowane w pracy [H5]. Dodatkowo można wprowadzać do tych funkcji trzy rodzaje tzw. funkcji anizotropowego zniszczenia materiału przez co uzyskuje się zmianę wartości tego obiektu w funkcji jego orientacji w przestrzeni a więc właściwie można mówić o polach tych obiektów. Wykorzystując te obiekty do opisu wytrzymałości w postaci wielomianu znacznie uelastyczniamy ten opis w stosunku do wielomianu tensorowego. Mianowicie przykładowo, w wielomianie tensorowym w strukturalnym układzie współrzędnych muszą się znaleźć wszystkie wyrazy określonego rzędu sześciu naprężeń z powiązanymi ze sobą współczynnikami z

układu zasadniczego podczas gdy w wielomianie zdefiniowanym na obiektach jednostkowych wiele z nich można pominąć.

**Zastosowanie do opisu wytrzymałości materiałów w miejsce symetrycznych tensorów parzystych rzędów ich obiektów wypełnia pierwsze założenie opracowywanej teorii. Drugie założenie spełnia rozbitcie pierwszego obiektu podstawowego na dwa obiekty w postaci wektora jednostkowego i wektora do niego przeciwnego.**

Obiekty te są odpowiednio przypisane oddzielnie do rozciągania i ściskania rozpatrywanego materiału. Natomiast inne obiekty formułowane są podobnie jak poprzednio z tym, że na bazie trzech obiektów podstawowych. Obiekty, które zawierają w swojej strukturze obiekty podstawowe charakteryzujące rozciąganie, ściskanie i rozciąganie oraz ściskanie opisują tylko określone hiperpowierzchnie w sześciowymiarowej hiperprzestrzeni naprężeń. Tych hiperpowierzchni jest osiem ponieważ w każdym oktancie przestrzeni naprężeń normalnych inna powierzchnia opisuje wytrzymałość niejednorodnych materiałów anizotropowych a naprężenia styczne nie wnoszą dalszych podziałów sześciowymiarowej hiperprzestrzeni naprężeń. Ze względu na występowanie czterech następujących kombinacji w kartezjańskim układzie trzech naprężeń normalnych: trzech naprężeń ściskających, dwóch ściskających i jednego rozciągającego, dwóch rozciągających i jednego ściskającego oraz trzech rozciągających hiperpowierzchnie te mogą być zapisane w postaci czterech niezależnych równań. Osiem przecinających się hiperpowierzchni spełnia drugie założenie sformułowanej teorii w postaci nowego wielomianu naprężeń za pomocą którego można opisywać wytrzymałość rzeczywistych materiałów anizotropowych.

Powyzsza teoria opisu wytrzymałości niejednorodnych materiałów anizotropowych została wykorzystana w pracy [H3] do opisu wytrzymałości drewna sosnowego na rozciąganie i ściskanie w płaszczyźnie LR ortotropii z uwzględnieniem jego masy właściwej. Rozpatrzono cztery matematyczne modele wytrzymałościowe drewna w tej płaszczyźnie. Dwa pierwsze bazowały na jednostkowych obiektach drugiego i czwartego rzędu symetrycznych tensorów wytrzymałości drewna przy czym w drugim modelu wykorzystano pierwszego rodzaju funkcję anizotropowego zniszczenia materiału. Dwa opisy trzeciego modelu oparto na jednostkowych obiektach pierwszego i drugiego rzędu oddzielnie dla rozciągania i ściskania. Czwarty model różnił się od trzeciego tym, że w układzie zasadniczym cztery obiekty zlewały się w dwa jednostkowe obiekty tensorów drugiego i czwartego rzędu i dodatkowo wykorzystano w obiekcie

pierwszego rzędu funkcję anizotropowego zniszczenia drewna. Ilość parametrów w kolejności do rozpatrywanych modeli wynosiła: jeden, dwa, sześć i cztery.

**W pracy wykazano, że niekoniecznie wraz ze wzrostem ilości parametrów wzrasta poprawność opisu materiału anizotropowego, ponieważ bardzo poprawny opis uzyskano przy zastosowaniu czwartego modelu (rys.13 i 14 w pracy [H3]). Ponieważ opis ten jakościowo przewyższa opis zaproponowany w pracy [H2] przez co niewątpliwie także przewyższa opisy z zastosowaniem symetrycznych tensorów parzystych rzędów.**

Podsumowując należy stwierdzić, że zastosowanie tensora naprężeń w odniesieniu do naprężeń średnich dla rzeczywistych anizotropowych materiałów ciągłych jak też nieciągłych, które są materiałami niejednorodnymi wydaje się niewłaściwe ponieważ obserwacje zniszczonych struktur jak też dane doświadczalne nie potwierdzają występowania zależności tensorowych pomiędzy naprężeniami. Zastosowanie tensora naprężeń niszczących do opisu wytrzymałości anizotropowych materiałów znacznie ogranicza możliwości tych opisów. Poprawność tensorowego opisu wytrzymałości zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się niejednorodności materiałów w skali makro a więc praktycznie oznacza to zmniejszaniem się ich anizotropii. W konsekwencji wykorzystanie zależności tensorowych naprężeń do opisów wytrzymałościowych może być uzasadnione w przypadku materiałów uważanych za izotropowe których wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie są takie same niż w przypadkach gdy te wytrzymałości są różne pomimo, że dla jednoosiowych naprężeń normalnych zależności tensorowe dają ścisłe rozwiązanie. Jednak w tych przypadkach opisy przy trójosiowym ścisaniu i rozciąganiu powinny być raczej różne ze względu na inne mechanizmy zniszczenia zachodzące w strukturach tych materiałów. To powoduje, że opis wytrzymałościowy dla takich materiałów powinien raczej opierać się na ośmiu hiperpowierzchniach.

Zaprezentowana teoria znacznie rozszerza możliwości ogólnego opisu wytrzymałości materiałów anizotropowych. Teoria ta może być stosowana do rzeczywistych materiałów konstrukcyjnych charakteryzujących się niemożliwością uzyskania w ich strukturze stałego pola tensorowego naprężeń pod wpływem obciążenia zewnętrznego. Zastosowanie w tych przypadkach tensora naprężeń do ogólnego opisu wytrzymałości wydaje się być tylko matematycznym zamodelowaniem opisu który nie odzwierciedla procesów uszkodzania struktury materiału zachodzących na skutek obciążenia zewnętrznego. Dlatego w

przeciwieństwie do zaproponowanej teorii należy liczyć się z tym, że przeprowadzone modelowanie na bazie tensorów może dać tylko przybliżony ogólny opis wytrzymałości rzeczywistych materiałów anizotropowych. Powyższa teoria związa się do ogólnych teorii wytrzymałościowych opartych na zależnościach tensorowych naprężeń Cauchy [18] z 1827 r. w przypadku jednorodnych ośrodków ciągłych.

#### Literatura

- [1] Galicki J., Jakowluk A., Similarity of failure criteria in an asymmetrical cycle of fatigue and thermal fatigue in complex stress states, *Strength Mater.*, 1995, 27, 70-74.
- [2] Goodman J.R., Bodig J., Orthotropic elastic properties of wood, *J. Struct. Div.*, 1970, 96, 2310-2319.
- [3] Mises R., *Mechanik der Festen Körper im plastisch deformierten, Zustand.* Göttin. Nachr. Math. Phys., 1913, 1, 582-592.
- [4] Huber M.T., O podstawach teorii wytrzymałości, *Prace Matematyczno – Fizyczne*, 1904, t.15, 47-59.
- [5] Hencky H., Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen, *ZAMM*, 1924, 4, 323-334.
- [6] Schleicher F., Der Spannungszustand an der Fließgrenze (Plastizitätsbedingung), *ZAMM*, 1926, 6, 199-216.
- [7] Drucker D.C., Prager W., Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Quarterly of Applied Math.*, 1952, 10, 157-165.
- [8] Hill R., A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metal, *Proc. R. Soc.*, 1948, 193, 281-297.
- [9] Cazacu O., Cristescu N.D., A paraboloid failure surface for transversely isotropic materials, *Mech. Mater.*, 1999, 31, 381-393.
- [10] Hoffman O., The brittle strength of orthotropic materials, *J. Compos. Mater.*, 1967, 1(2), 200-206.
- [11] Goldenblat I.I., Kopnov V.A., Strength of glass-reinforced plastics in the complex stress state, *Mekhanika Polimerov*, 1965, 1, 70-78.
- [12] Malmajster A.K., Geometry of theories of strength, *Mekhanika Polimerov*, 1966, 2, 519-527.
- [13] Tsai S., Wu E.M., A general theory of strength for anisotropic materials, *J. Compos. Mater.*, 1971, 5, 58-80.
- [14] Cauchy A.L., Sur la condensation et la dilatation des corps solides, *Exercices de Mathématiques*, 1827, 2, 60-69.

- [15] Kollmann F., Die Abhängigkeit der Festigkeit und der Dehnungszahl der Hölzer von Faserverlauf, Bauingenieur, 1934, 19-20.
- [16] Hill R., Constitutive modeling of orthotropic plasticity in sheet metals, J. Mech. Phys. Solids 1990, 38, 405-417.
- [17] Puck A., Schürmann H., Failure analysis of FFR laminates by means of physically based phenomenological models, Comp. Sci. Technol. 1998, 58, 1045-1067.
- [18] Cauchy A.L., De la pression ou tension dans un corps solide, Exercices de Mathématiques, 1827, 2, 42-56.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Istotnym zagadnieniem w ogólnych opisach wytrzymałościowych materiałów anizotropowych jest włączenie do opisu doświadczalnych zależności wytrzymałości materiałów głównie na pewnych kierunkach w funkcji parametrów związanych ze strukturą materiałów. Tymi parametrami mogą na przykład być gęstość w odniesieniu do drewna lub stosunek objętościowy frakcji włókna do całkowitej objętości w przypadku jednokierunkowych kompozytów. Natomiast kierunkami tymi są: kierunek tracheidów lub kierunek ułożenia włókien. W omówionych pracach pokazano, w jaki sposób te parametry mogą być włączone do ogólnych opisów wytrzymałości niejednorodnych materiałów anizotropowych. Ponadto dla poprawnego opisu istotny jest dobór odpowiednich parametrów, który może być dokonany na podstawie analizy tab. 1 zamieszczonej w pracy [H4] przy uwzględnieniu odpowiedniej anizotropii rozpatrywanego materiału.

16.07.2013

.....  
Data

.....  
Jan Golicki

Podpis habilitanta