

TEZĂ DE ABILITARE

**CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND STĂRILE DE
TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII ÎN STRUCTURILE MECANICE**

Domeniul: Inginerie Mecanică

**Autor: prof. dr. ing. Adrian Marius PASCU
Universitatea "Lucian Blaga" din Sibiu**

Sibiu – 2016

REZUMAT

Primul capitol „*Studiul, modelarea, testarea și optimizarea structurilor de tip de plasă de sârmă țesute sau împletite confecționate din diferite materiale*” prezintă pentru început câteva generalități și domenii de utilizare a structurilor de tip plasă de sârmă țesute sau împletite, fiind amintite aici și cazul textilelor realizate prin țesere sau împletire și utilizate în domenii speciale (industria auto, industria aeronautică, industria de apărare etc). În continuare este prezentat un model analitic de calcul al tensiunilor și deformațiilor în laturile unui ochi de plasă de sârmă cu ochiuri pătrate solicitată la tracțiune în planul structurii. De asemenea este prezentat un model analitic de calcul al deformațiilor din laturile unei rețele de plasă de sârmă cu ochiuri hexagonale solicitată tot la tracțiune în planul structurii. Capitolul se continuă cu prezentarea unei metode experimentale de determinare a coeficientului de frecare dintre fire (Capstan method) metodă standardizată conform ASTM 3412-89, fiind prezentate rezultatele experimentale obținute în urma testării a două tipuri de materiale (fire) și anume Kevlar 29 și Nylon 6.6. Testele au fost efectuate la trei viteze de solicitare diferite (1 mm/min, 10 mm/min și 100 mm/min) și la cinci temperaturi diferite (-50°C, 0°C, 25°C, 50°C și 100°C). În urma acestor încercări au fost trasate pentru fiecare caz în parte curbele caracteristice forță-deformație, precum și grafice de variație a coeficientului de frecare în funcție de alungirea firului, sau în funcție de viteza de solicitare a firului. De asemenea s-a făcut și o analiză comparativă a rezultatelor pentru toate condițiile de testare în cazul ambelor materiale studiate. Acest studiu experimental a stat mai apoi la baza realizării unui model vâsco-hiperelastice menit să descrie comportamentul țesăturilor realizate din fibre polimerice. În cadrul acestui studiu s-au realizat pentru început încercări experimentale cu scopul de a determina caracteristicile mecanice și elastice ale firelor de Kevlar 29 și Nylon 6.6 supuse la tracțiune uniaxială. S-au realizat analize micrografice, determinându-se, printre altele, densitatea fibrelor dintr-un fir de Kevlar 29 și Nylon 6.6. Modelul matematic creat mai ține cont de comportamentul vâscoelastice ridicat al firelor polimerice, precum și de efectul temperaturii asupra caracteristicilor acestor fire. Peste curbele caracteristice determinate experimental s-au suprapus cele rezultate în urma utilizării modelului creat, constatându-se o foarte mare similitudine între acestea, ceea ce vine să valideze rezultatele obținute. Un alt tip de teste efectuate în cadrul acestui studiu a fost cel al testelor de impact a țesăturilor din fire de Kevlar 29 și respectiv Nylon 6.6, cu gloanțe (proiectile) de calibru 10 mm (la diverse viteze inițiale de impact), testele realizându-se cu ajutorul dispozitivelor de tip Hopkinson Bars. Totodată, având la baza modelul matematic anterior amintit, s-a realizat o simulare numerică în regim dinamic a impactului proiectilului cu țesătura, fiind comparate, în final rezultatele obținute prin cele două metode, putându-se concluziona că fenomenul de histerezis, care este prezent în toate comportamentele mecanice ale acestor tipuri de structuri este cauzat mai ales de frecarea

dintre fibre și cea dintre fire, iar comportamentul vâsco-elastic al unei țesături depinde de proprietatea fibrelor care alcătuiesc firul și materialul acestora. De asemenea, se poate spune ca vâscoelasticitatea fibrelor se manifestă în mod direct asupra vâscoelasticității structurii. Trebuie reținut faptul că modele de element finit 3D oferă cele mai multe detalii privind comportarea mecanică a țesăturii, dar sunt foarte solicitante din punct de vedere al necesarului de calcul pentru a modela structuri mari.

Capitolul doi, intitulat „*Studiul, modelarea, testarea și optimizarea structurilor de tip placă perforată confecționate din diferite materiale*” prezintă pentru început câteva generalități și domenii de utilizare a structurilor de tip placă perforată, alături de câteva elemente de calcul a plăcilor ortotrope. În continuarea capitolului este prezentat un studiu experimental și numeric al comportamentului plăcilor perforate cu orificii circulare dispuse în ”zigzag” (în ”Z”) la tracțiune uniaxială. Datele experimentale au fost prelucrate statistic și totodată s-au trasat grafice de variație a diverselor caracteristici mecanice și elastice ale structurii în funcție de aria secțiunii transversale inițiale a epruvetei, fiind astfel posibilă obținerea unor ecuații de regresie pentru acete caracteristici studiate. În ceea ce privește analiza numerică a acestor tipuri de structuri, aceasta a fost una de tip neliniar și a fost realizată atât pentru placa perforată tetată experimental cât și pentru alte tipuri de perforații (pătrate, canal de pană dispuse în paralel și în ”Z”, circulare dispuse în paralel). O abordare deosebită în cadrul acestor simulări numerice o constituie faptul că este prezentată comportarea acestor structuri până în momentul ruperii acestora. Rezultatele obținute în cadrul acestui capitol sunt prezentate pentru fiecare mod de perforare și tip de solicitare în parte sub o formă grafică și de asemenea sunt trasate grafice comparative pentru diverse tipuri de perforări. Rezultatele simulărilor numerice au fost comparate cu cele experimentale, obținându-se o bună similitudine între ele. Tot în cadrul acestui capitol, a fost realizat un studiu al forțelor ce apar la încovoierea plăcilor perforate (încovoiere în V), studiu efectuat cu ajutorul unui captor electrotensometric, achiziția datelor experimentale fiind realizată cu ajutorul unui instrument virtual în programul TestPoint, pachet software care însoțește placa de achiziție folosită și care este dedicat achizițiilor de date. Instrumentul conține blocuri puse la dispoziția utilizatorului de către program care permit modificarea numărului de canale pe care se face achiziția, rata de achiziție, durata totală a achiziției, filtrarea datelor în scopul eliminării „zgomotului” inerent oricărei achiziții și salvarea datelor sub forma unor fișiere de tip text. Tot cu ajutorul unor simulări numerice în domeniul neliniar s-a studiat distribuția de tensiuni și deformații specifice în diverse tipuri de plăci perforate solicitate de sarcini perpendiculare pe planul plăcii (încovoiere în V). Toate aceste studii /simulări numerice au fost realizate cu ajutorul pachetului de programe LS-DYNA.

În capitolul trei intitulat „*Studiul, comportamentului la solicitări statice și dinamice (oboseală) a oțelurilor obținute prin tehnica LENSTM*” sunt prezentate cercetări referitoare la plasticitatea ciclică și comportamentul la oboseală a unui oțel inoxidabil AISI 316L obținut prin tehnologia LENSTM – Laser Engineered Net Shaping, fiind investigate fenomene de la nivelul microstructurii materialului, care mai apoi au fost cuantificate, alături de comportamentul la solicitarea

variabilă în timp (oboseală), de modul de inițierea a fisurii, care se poate datora unor incluziuni mari, a unor pori din material sau a pulberilor netopite aflate în apropierea suprafeței libere a epruvetelor testate, într-un model matematic de tip MSF (Multi Stage Fatigue Model). Au mai fost luate în considerare în acest studiu și influența factorului de formă sferică a porilor, durata de incubare a fisurii la oboseală, etapa de creștere și dezvoltare a fisurii la oboseală, apariția fisuri mici în regiunea de graniță a grăunților de material în vecinătatea vârfului fisurii principale. În cadrul acestui studiu a fost determinată și compoziția chimică a oțelului inoxidabil 316L precum și nivelul porozității acestuia. Evaluarea porozității s-a realizat atât 3D, prin utilizarea unui CT-Xray cât și 2D prin utilizarea unui microscop optic de mare putere. S-au efectuat de asemenea teste cvasistatice la tracțiune uniaxială în urma cărora s-au putut trasa curbele caracteristice reale de tip true stress vs. true strain și teste în regim dinamic (oboseală uniaxială cu $R = -1$). Cu ajutorul rezultatelor obținute în urma testelor de oboseală, s-a putut trasa curba duratei de viață pentru materialul testat. Suprafețele de rupere la oboseală ale epruvetelor testate au fost studiate cu ajutorul unui microscop de tip SEM (Scanning Electron Microscope) putându-se astfel determina locul de inițiere a fisurilor la oboseală. Tot cu ajutorul SEM-ului au putut fi măsurate dimensiunile striatiilor ce apar în porțiunea netedă a secțiunii de rupere la oboseală, fiind prezentat totodată și un studiu privind legătura între lungimea fisurii la oboseală și dimensiunile striatiilor ce au fost observate în aceste zone de creștere a fisurilor la oboseală. În finalul acestui capitol este prezentat modelul matematic de tip MSF (MultiStage Fatigue Model) dezvoltat pentru acest oțel inoxidabil 316L, fiind prezentate atât curbele de histerezis în cazul solicitărilor la oboseală precum și parametrii din cadrul acestui model MSF, iar în încheiere este prezentat sub formă grafică modul în care se realizează corelația dintre rezultatele experimentale și modelul MSF pentru curba duratei de viață a oțelului inoxidabil 316L – LENS.

Capitolul patru *”Studiul asupra comportamentului biomecanic al cilindrilor osteocondrali transplantați la nivelul condilului femural de vită”* prezintă o serie de studii experimentale asupra rezistenței la presiune a cilindrilor osteocondrali transplantați la nivelul condilului unui femur de vită. Analiza biomecanică a încărcării unui genunchi de vită având un transplant osteocondral autolog la nivelul unui condil femural urmărește evaluarea comportamentului cilindrilor transplantați la presiune. Aceasta s-a realizat pentru diferite diametre ale cilindrilor și pentru diferite suprafețe ale leziunii condrale. Scopul studiului este de a determina dacă încărcarea mecanică a cilindrilor transplantați determină deplasarea acestora (înfundarea), cu compromiterea rezultatului biologic și funcțional al transplantului. De asemenea, s-a determinat și valoarea presiunii la care se înfundă cilindri transplantați. Totodată au fost efectuate și determinări experimentale în vederea determinării forței de frecare dintre grefă și tunelul receptor, caracteristicile la compresiune ale cilindrului osteocondral și influența poziționării cilindrului până la nivelul bazei tunelului receptor. Încercările experimentale s-au efectuat pe mașina de încercare Instron 5587, pentru a determina deformarea de la nivelul condililor femurali, la forțe de la 0 N până la înfundarea transplantului de-a lungul axului femurului, iar pentru a determina deformațiile specifice și tensiunile de la nivelul zonei de transplant a fost

folosit softul mașinii Instron și o metoda optică ce utilizează un echipament optic Aramis 2M. S-au realizat în cadrul acestui studiu și teste referitoare la determinarea forței la care cilindrul osteocondral se deplasează în raport cu cilindrul primitor permite evidențiază faptul că forța la care cilindrul osteocondral se deplasează în raport cu cilindrul primitor are variații semnificative în funcție de diverși parametri luați în considerare. O altă încercare experimentală realizată a fost aceea destinată analizei raportului dintre lungimea cilindrului și adâncimea tunelului primitor (r), fiind achiziționate date care au permis analiza la diferite presiuni de încărcare a mai multor parametri, fiind evaluate astfel următoarele mărimi: deformația specifică principală (Major Strain ε_1), deformația specifică secundară (Minor Strain ε_2), deformația specifică echivalentă (von Mises Strain), precum și deplasările pe axa X, deplasările pe axa Y și deplasarea totală Δ . În cadrul acestor cercetări, s-a realizat și un studiu privind analiza proprietăților mecanice ale femurului la încărcare axială, în condițiile prelevării de cilindri osteocondrali, studiu efectuat tot cu ajutorul mașinii de încercare instron și a sistemului optic Aramis. În ultimul parte a acestui capitol este prezentată o analiză numerică utilizând metoda elementului finit a comportării la încărcare statică a femurului uman la nivelul căruia a fost realizat un transplant osteocondral autolog. Pentru a putea efectua analiza prin metoda elementului finit a comportării mecanice a femurului uman la compresiune am realizat scanarea unui femur și a unei tibii recoltate de la un cadavru, cu ajutorul scannerului tridimensional NextEngine Scan 3D. Imaginile brute obținute au fost prelucrate cu programul Next Engine, obținându-se imagini tridimensionale ale osului din diferite poziții, pentru ca în final să se obțină un model 3D care ulterior a fost prelucrat cu ajutorul programului Catia și exportat în programul de analiză prin metoda elementului finit Ansys. Analiza a fost efectuată pentru cilindri osteocondrali cu lungimea de 20 mm și diametrul de 8 mm și 6 mm. Pentru cilindrul cu diametrul de 8 mm au fost simulate cazurile în care a fost necesară transplantarea a 1, 2, 3, 4 și 6 cilindri. Aria aproximativă care se acoperă cu 4 cilindri este de 2 cm^2 , iar cu 6 cilindri de 4 cm^2 . Pentru cilindri cu diametrul de 6 mm am efectuat analize pentru 6, respectiv 9 cilindri transplantați, ceea ce corespunde cu aproximativ 2 cm^2 și 4 cm^2 . Sarcina aplicată de-a lungul axului mecanic al ansamblului, considerând punct fix (constrângere) la nivelul secțiunii prin diafiza tibială, a fost de 1.200 N, cu scopul de a păstra o limită de siguranță în ceea ce privește stabilitatea grefonului utilizat pentru analizele ulterioare, această valoare corespunzând unui om de 120 kg în sprijin unipodal. Simularea efectuată în Ansys a permis analiza la încărcarea cu 1.200 N a mai multor parametri în orice punct de la nivelul masei osoase a femurului și cilindrului osteocondral transplantat, evaluate astfel următoarele mărimi: deformația specifică echivalentă (von Mises Strain), deplasarea totală Δ , tensiune principală, tensiunea echivalentă von Mises precum și factorul de siguranță pentru un singur caz din cele menționate anterior și anume cazul femurului cu 6 cilindrii osteocondrali (de diametrul 8 mm) transplantați, femurul având defectul condral de aproximativ 4 cm^2 .

Summary

The first chapter, “The Study, Modelling, Testing and Optimizing of Woven or Braided Wire Mesh Structures Made from Various Materials”, begins by presenting a few general ideas and applications of woven or braided wire mesh structures, the case of textiles produced by weaving or braiding and used in special fields (e.g. the automotive industry, the aircraft industry, the defence industry) being mentioned here. The chapter continues by putting forward an analytical model for calculating the stresses and strains that develop along the sides of a square wire mesh withstanding tensile strain within the plan of the structure. It also offers an analytical model for calculating the strains developing along the sides of a hexagonal wire netting that also undergoes tensile strain within the plan of the structure.

The chapter then goes on to present an experimental method for determining the coefficient of friction between the threads (the Capstan equation) – a standardized method according to ASTM 3412-89. The experimental results were obtained by testing two types of materials (threads), i.e. Kevlar 29 and Nylon 6.6. The tests were performed at three different strain rates (1 mm/min., 10 mm/min. and 100 mm/min.) and five different temperatures (-50°C, 0°C, 25°C, 50°C and 100°C). Following these tests, the typical load-strain curves were drawn for each case, as well as the variation graphs of the coefficient of friction dependent on the thread elongation or on the thread strain rate.

Furthermore, a comparative analysis of the results for both studied materials, in all testing conditions, was performed. This experimental study provided the basis for a visco-hyperelastic model intended to describe the behaviour of fabrics made from polymer fibres. The study began with experimental tests devised to determine the mechanical and elastic features of the Kevlar 29 and Nylon 6.6 fibres subjected to uniaxial tensile strain. Micrographic analyses determining, among other things, the density of the Kevlar 29 and Nylon 6.6 fibres were conducted. The designed mathematical model takes into account the highly viscoelastic behaviour of polymer fibres and the effect of temperature on their characteristics. The experimentally determined characteristic curves were overlapped with those resulting from the application of the designed model, a close similarity between them being noticed, which comes to validate the results obtained.

Another type of tests applied in this study referred to the impact on fabrics made from Kevlar 29 and Nylon 6.6 fibres of 10 mm calibre bullets (missiles) (at various initial impact speeds). The tests were performed with the help of Hopkinson bars devices. Concurrently, based on the above-mentioned mathematical model, a dynamic numerical simulation of the missile impact

on the fabric was carried out. The final results obtained by the two methods were then compared, and a conclusion was drawn that the hysteresis phenomenon, which is found in all the mechanical behaviours of these types of structures, is mainly caused by friction between the fibres and between the threads, and that the viscoelastic behaviour of a fabric depends on the property of the fibres that make up the thread as well as on their material. Moreover, the viscoelasticity of the fibres can be said to have a direct effect on the viscoelasticity of the structure. One should note that 3D finite element models offer the most numerous details on the mechanical behaviour of the fabric, but are very demanding in terms of the computing needed to model large structures.

Chapter Two, entitled “The Study, Modelling, Testing and Optimizing of Perforated Plate Structures Made from Various Materials”, starts by providing a few general ideas and applications of perforated plate structures, as well as several calculation elements for orthotropic plates. The chapter continues by putting forward an experimental and numerical study of the behaviour of perforated plates with circular holes arranged in a “zigzag” pattern (“Z”) subjected to uniaxial tensile strain. The experimental data were statistically processed and variation graphs of the different mechanical and elastic properties of the structure were drawn relative to the initial cross-sectional area of the sample, thus making it possible to obtain regression equations for the studied characteristics. The numerical analysis of these types of structures was non-linear and was performed both for the experimentally tested perforated plate and for other types of perforations (square, keyway, arranged in parallel and in a “Z” pattern, and circular, arranged in parallel). One particular approach to these numerical simulations is the illustration of the behaviour of these structures up to their yield point. The results obtained in this chapter are graphically presented for each puncture method and type of strain, comparative charts being also drawn for different types of perforations. The results of the numerical simulations were compared with the experimental ones, a close similarity between them being noticed.

A study of the stresses occurring on the bending of perforated plates (V-bending) was also conducted in this chapter. The study was carried out with the help of an electrotenometric sensing device, while the experimental data were processed by means of a virtual instrument in TestPoint, a software package that accompanies the acquisition board used and that is dedicated to data acquisition. The tool includes blocks made available to the user by the program, which allow changing the number of channels along which the acquisition takes place, the acquisition rate, and the total acquisition time. In addition, they enable data filtering, in order to eliminate the “noise” inherent to any acquisition, and saving data in the form of text files. Also with the help of non-linear numerical simulations, the distribution of stresses and strains typical of various types of perforated plates subjected to strains that are perpendicular to the plan of the plate (V-bending) was studied. All these numerical studies/simulations were carried out with the help of the LS-DYNA software package.

The third chapter, entitled “The Study of the Behaviour of Steels Subjected to Static and Dynamic Strains (Fatigue) and Produced with the LENSTM Technique”, presents research findings on the cyclic plasticity and fatigue behaviour of the AISI 316L stainless steel obtained with the LENSTM technology – Laser Engineered Net Shaping. The investigated phenomena referred to the microstructure of the material, which were then quantified, together with the behaviour of the material subjected to cyclic loading (fatigue), the physics of crack initiation, which may be due to large inclusions, pores in the material or unmelted powder located near the uncovered surface of the tested samples, in the form of a MSF (Multi Stage Fatigue) mathematical model.

The study also considered the influence of the factor of spherical pores, the incubation period of the fatigue crack, the stage of growth and development of the fatigue crack, the appearance of small cracks within the border of the grains of material in the vicinity of the head of the main crack. Moreover, the study determined the chemical composition of the 316L stainless steel and the degree of its porosity. The porosity was evaluated three-dimensionally, by using a CT-Xray, and two-dimensionally, by using a high-power optical microscope. Quasi-static tests for the uniaxial tensile strain were also conducted, upon which true stress vs. true strain real characteristic curves in dynamic conditions (uniaxial fatigue with $R = -1$) were drawn. With the help of the results obtained from the fatigue tests, the curve of the lifespan of the tested material was drawn. The fatigue fracture surfaces of the samples tested were studied with the help of a SEM (Scanning Electron Microscope). Thus, the location of the fatigue crack initiation was determined. Also with the help of the SEM, the dimensions of the grooves that appear within the flat area of the fatigue fracture section were measured. At the same time, a study was made on the relationship between the length of the crack fatigue and the dimensions of the grooves that have been noticed in these areas of spreading fatigue cracks.

The final part of this chapter puts forward the MSF (Multistage Fatigue) mathematical model, developed for the 316L stainless steel, and illustrates both the hysteresis curves for fatigue strains and the parameters within the MSF model. The mode in which the correlation between the experimental results and the MSF model for the curve of the lifespan of the 316L – LENS stainless steel is established is graphically presented.

Chapter Four, “The Study of the Biomechanical Behaviour of an Osteochondral Cylinder Transplanted on a Cow’s Femoral Condyle”, presents a series of experimental studies on the resistance to pressure of the osteochondral cylinders transplanted on the condyle of a cow’s femur. The biomechanical analysis of loading a cow’s knee having autologous osteochondral transplantation at the level of a femoral condyle aims at evaluating the behaviour of the cylinders transplanted under pressure. This was performed for various diameters of the cylinders and various surfaces of the chondral lesion. The purpose of the study was to determine whether the mechanical loading of the transplanted cylinders determines their displacing (clogging), thus compromising the biological and functional outcome of the

transplant. The value of the pressure that causes the clogging of the transplanted cylinders was also determined.

Concurrently, experimental calculations were performed to determine the friction between the graft and receiving tunnel, the compression characteristics of the osteochondral cylinder and the influence of positioning the osteochondral cylinder at the base of the receiving tunnel. The experimental tests were performed on the Instron 5587 test machine, in order to determine the strain of the femoral condyles when subjected to stresses ranging from 0 [N] until the transplantation along the femur axis is clogged. The Instron machine software and an optical method that employs the Aramis 2M optical equipment were used to determine the stresses and strains in the transplantation area. In this study, tests devised to determine the stress to which the osteochondral cylinder is displaced relative to the receiving cylinder were also performed. They emphasized the fact that that stress that causes the osteochondral cylinder to be displaced relative to the receiving cylinder varies significantly depending on the various parameters taken into consideration.

Another experiment conducted aimed at analyzing the ratio between the cylinder length and the depth of the receiving tunnel (r). As a result, data enabling the analysis of several parameters for various loading pressures were gathered; thus, the following values were assessed: the major specific strain (Major strain ϵ_1), the minor specific strain (Minor Strain ϵ_2), the equivalent specific strain (von Mises Strain), the displacements along the X and Y axes and total displacement Δ . The research includes a study on the analysis of the mechanical properties of the femur subjected to axial load, in the case of the sampling of osteochondral cylinders, conducted with the help of the Instron testing machine and the Aramis optical system.

The last part of this chapter presents a numerical analysis, using the finite element method, of the behaviour of the human femur, subjected to static load, on which autologous osteochondral transplantation was conducted. To perform the analysis, by means of the finite element method, of the mechanical behaviour of the human femur subjected to compression, we scanned a femur and a tibia, sampled from a corpse, with the help of the NextEngine Scan 3D scanner. The raw images obtained were processed with the Next Engine software, three-dimensional images of the bone from different angles being acquired. The final result was a 3D model, which was afterwards processed with the help of Catia and exported to the analysis program through the Ansys finite element method.

The analysis was conducted for osteochondral cylinders with a length of 20 mm and diameters of 8 mm and 6 mm. For the 8 mm diameter cylinder, a simulation of the cases requiring the transplantation of 1, 2, 3, 4 or 6 cylinders was performed. The approximate area covered with 4 cylinders is of 2 cm², and the one covered with 6 cylinders is of 4 cm². In the case of 6 mm diameter cylinders, we carried out tests for 6 and 9 transplanted cylinders, which corresponds to about 2 cm² and 4 cm². The load applied along the mechanical axis of the assembly,

considering a fixed point (coercion) in the section through the tibial diaphysis was of 1.200 N, which allowed for keeping a safety margin in terms of the stability of the graft used for further analyses. This value corresponds to a person weighing 120 kg in unipodal support. The simulation performed in Ansys enabled the analysis of several parameters, in the case of a 1,200 N loading, at any point along the femoral bone and the transplanted osteochondral cylinder. Thus, the following values were assessed: the equivalent specific strain (von Mises Strain), total displacement Δ , the major strain, the von Mises equivalent strain and safety factor, for one single case out of the above-mentioned ones, i.e. the femur having 6 transplanted osteochondral cylinders (with a diameter of 8 mm). The femur had a chondral defect of about 4 cm².