Zastosowanie elektrostymulacji w leczeniu uszkodzeń tkanek miękkich i kości

Clinical effects of elecromagnetic and electric fields stimulation on bone and soft tissue healing processes

Drygalski M., Bożek M., Bielecki T., Gaździk T.Sz.
Ośrodek: Katedra i Oddział Kliniczny Ortopedii ŚAM w Sosnowcu
Kierownik: prof. dr hab. med. Tadeusz Szymon Gaździk

Wojewódzki Szpital Specjalistyczny nr 5, pl. Medyków 1, 41-200 Sosnowiec
tel. (032) 3682029, (032) 3682623, fax (032) 3682621
e-mail: **tgazdzik.ortopedia@wss5.pl**

Streszczenie
W ostatnim czasie doszło do znacznego rozwoju technik leczenia uszkodzeń tkanki kostnej. Niestety w wielu przypadkach nadal dochodzi do wystąpienia zaburzeń zrostu pod postacią zrostu opóźnionego lub stawu rzekomego. Te niepowodzenia spowodowały, że wielu lekarzy klinicystów zaczęło dogłębnie analizować procesy zachodzące podczas prawidłowego, fizjologicznego gojenia oraz poszukiwać nowych metod leczenia jego zaburzeń. Wynikiem tych poszukiwań stało się opracowanie wielu nowoczesnych metod stabilizacji miejsca złamania oraz metod wspomagających i stymulujących procesy zrostu kostnego. Jedną z metod przyspieszających proces gojenia miejsca złamania stała się stymulacja prądem elektrycznym, opisana w połowie XX wieku.

Słowa kluczowe: zrost kostny, stymulacja elektryczna, stymulacja elektromagnetyczna

Summary
A significant progress in the therapeutic methods of a fractured bone treatment is noted lately. Unfortunately in many cases patients experience impaired healing like delayed union or nonunion. Such failures in treatment forced many clinicians to a deep and detailed analysis of a physiological, correct healing and to seek for new methods of managing healing disturbances. These studies resulted in many modern techniques of fracture stabilization, accessory treatment and union stimulation. Electric stimulation of the fractured place is one of the stimulating techniques, described in the ’50 of the last century.

Key words: union, delayed union, nonunion, electric stimulation, electromagnetic stimulation

WSTĘP

Elektrostymulacja znalazła swoje zastosowanie w fizykoterapii, choć coraz częściej stosowana jest w ortopedii celem aktywizacji procesów naprawczych w uszkodzonej kości. W ostatnich latach podjęto intensywne badania zmierzające do wyjaśnienia przyczyn zaburzeń gojenia tkanki kostnej oraz określenia sposobów im zapobiegania i leczenia. Procesy regeneracji kości są złożone i nie zostały dotychczas w pełni poznane [37].

Pomimo znacznego postępu metod leczniczych, nadal w 5 do 10% złamań dochodzi do zaburzeń gojenia kości [27,36,37]. Procesy regeneracji złamań definiuje się jako lawinowy ciąg reakcji komórkowych i biochemicznych zainicjowanych urazem, których celem jest odtworzenie ciągłości i przywrócenie pierwotnej struktury uszkodzonej kości. Przyczyny zaburzeń gojenia kości są zróżnicowane. Wśród nich najważniejsze znaczenie odgrywają: niewystarczające ukrwienie końców kostnych i nieadekwatna stabiliza-

INTRODUCTION

Although electrostimulation found its place in physicotherapy, it is more and more used in activation of repairing processes in the injured bones. Intensive studies begun on the causes for impaired healing of the bones as well as on methods of prevention and treatment of such complications. Bone regeneration is a complex process and yet not completely studied [37].

Despite all the progress that has been made in the treatment 5-10% of cases are still affected by impaired healing [26,27,37]. Regenerative processes are described as an avalanche of cellular and biochemical events initiated by a fracture aimed at regaining of bone continuity and its primary structure. Causes of bone healing disturbances are different. Among them insufficient vascularisation and inadequate stabilization of bone fragments are of capital importance. The other include: to wide remnant gap after bones distraction, improper position of the ends, loss of tissue, presence

cja odłamów kostnych. Do pozostałych czynników zalicza się obecność zbyt szerokiej szczeliny złamania wywołanej dystrakcją odłamów, nieprawidłową pozycję końców względem siebie, ubytki kostne, złamanie z fragmentem pośrednim oraz infekcje. Do zakażeń tkanek miękkich i kości dochodzi najczęściej u chorych ze złamaniami otwartymi z powodu zabrudzenia odłamów kostnych i otaczających tkanek miękkich florą bakteryjną. Następnie dochodzi do rozwoju septycznego procesu zapalnego i powikłań regeneracji kości [21]. Również współistniejące choroby metaboliczne na przykład cukrzyca, czy choroby endokrynologiczne mogą zaburzać procesy regeneracji tkanki kostnej [28].

Do zaburzeń procesu gojenia tkanki kostnej zalicza się zrost opóźniony, brak zrostu oraz staw rzekomy. W pierwszym typie dochodzi do przekroczenia przeciętnego czasu gojenia kości tj. 6 miesięcy, ale widoczny jest stały powolny zrost kostny. Definicja braku zrostu nie została jasno sformułowana. Ostatnio uważa się, że jeśli nie występują cechy zrostu kostnego, a czas gojenia jest dłuższy od 4 miesięcy można stwierdzić, że występuje brak zrostu [36]. Niektórzy autorzy okres obserwacji procesu gojenia wydłużają do 6, a inni nawet do 9 miesięcy [37]. Stawem rzekomym nazywamy utrwalony brak zrostu. Jego pojawienie jest niezaprzeczalnym dowodem wyczerpania się procesów osteo i angiogenezy odpowiedzialnych za naprawę tkanki kostnej [20]. Przestrzeń pomiędzy końcami kostnymi wypełnia tkanka łączna włóknista lub włóknistochrzęstna. Wyróżnia się stawy rzekome biologicznie reaktywne, inaczej witalne oraz niereaktywne, czyli awitalne. Pierwsze charakteryzują się występowaniem płytkiej panewki w odłamie bliższym i zaokrąglonego końca odłamu dalszego. Ze względu na morfologię wyróżnia się staw rzekomy hipertroficzny, który charakteryzuje się znacznym przerostem końców kostnych [20,31]. Warunkiem powstania tego typu stawu rzekomego jest bardzo dobre unaczynienie końców kostnych i występowanie mikroruchów z powodu nieprawidłowej stabilizacji. Dochodzi wówczas do gojenia wtórnego z powstaniem dużej ilości kostniny. Staw rzekomy hipertroficzny z dużą ilością kostniny nazywany jest stopą słonia, z mniejszą stopą konia. Podczas mikroruchów dochodzi do uszkodzenia ciągłości naczyń krwionośnych i zahamowania procesu regeneracji kości. Drugim rodzajem stawu rzekomego witalnego jest staw oligotroficzny [10,36]. Charakteryzuje się on brakiem przerostu końców kostnych z zarośnięciem jamy szpikowej i prawidłowym ich ukrwieniem. Stawy rzekome awitalne występują w kościach o słabym unaczynieniu na przykład w 1/3 dalszej kości piszczelowej. Wyróżnia się dwie postacie tego stawu: dysplastyczną i aplastyczną. W pierwszej postaci dochodzi do osteoporozy końców kostnych i zamknięcia jamy szpikowej. Powodem jej powstania są zaburzenia ukrwienia ziarniny. Drugą postać charakteryzuje sklerotyzacja odłamów z otwartą jamą szpikową. Spowodowana jest ona najczęściej martwicą jednego lub obydwu odłamów [20].

of intermediate bone fragments and infections. The soft tissues and bone infections develop most often in open fractures due to bacterial contamination of the exposed bones and surrounding tissues. A septic inflammation and impaired union develop secondarily [21]. Coexisting metabolic disorders like diabetes and other hormonal malfunctions may additional affect bone regeneration [28].

Failure in bone repair has many forms like delayed union, nonunion and pseudoarthrosis. In the first form, time for union is longer then average 6 months, but slow progress is observed. Nonunion is not precisely described, some authors suggest that lack of bone healing symptoms and 4 months duration of a disease allow for such diagnosis [36]. Other authors suggest longer observation – 6 or 9 months [37]. A persistent lack of union between the fractured fragments is referred to as pseudoarthrosis. Development of a pseudoarthrosis is a proof for osteo- and angiogenesis depletion in bone repair [20]. Space between the ends of the bones is filled with either fibrous tissue. Pseudoarthrosis can be described as biologically reactive, i.e. vital or non-reactive, i.e. avital. In the first type a shallow socket appears on the proximal fragment and a rounded end on the distal one. Morphologically pseudoarthrosis can be described as hypertrophic, when significant overgrowth of the fractured ends develops [20,31]. It is possible only in well vascularised bone ends after improper immobilization with remnant micromobility of a joint. Pseudoarthrosis with enormous overgrowth of callus is often described as elephant's foot and with minor overgrowth is called equine foot. The micromovements in the pseudoarthrosis affect vessels continuity and inhibit bone regeneration. Another type of a vital pseudoarthrosis is the so called oligotrophic joint [10,36]. It is characterized by an overgrown medullary cavity, lack of hypertrophic ends and sufficient circulation. Avital pseudoarthrosis usually appear in poorly vascularized bones like in distal 1/3 of tibia. Two types of avital pseudoarthrosis are also distinguished: displastic and aplastic. In the first type osteoporosis in the fractured ends and occlusion of the medullary canal develop, due to vascular disorders in granulation. The second type is characterized by sclerotisation of the fractured fragments and by opened medullary canal. This usually develops because of either one or both fragments' necrosis [20].

Failures in management of the fractures like delayed union, nonunion, resulted in studies on optimal conditions of bone regeneration. There are few ways of bone union facilitation, among which two major groups can be mentioned: physical and biological [36]. First is presented by mechanical methods like weighting of a bone. Wolf presented a theory in 1892, where architecture of bony trabeculae undergo adaptation in bone remodeling depending on mechanical weighting [14]. In 1953 Ivan Yasuda described electric potential on the surface of a bone dependant on tension in the bone [19,

Niepowodzenia leczenia złamań pod postacią zrostu opóźnionego i braku zrostu zapoczątkowały poszukiwanie optymalnych warunków dla procesów regeneracji kości. Istnieje wiele sposobów wspomagania procesów gojenia kości. Można je podzielić na dwie główne grupy: fizyczne i biologiczne [36]. Do pierwszej grupy zaliczamy stymulację mechaniczną, polegającą na obciążaniu kości. W 1892 roku Wolf wysunął hipotezę, że architektura beleczek kostnych ulega adaptacji w wyniku remodelowania kości w zależności od obciążeń mechanicznych [14]. W 1953 roku dr Ivan Yasuda opisał zjawisko występowania potencjału elektrycznego na powierzchni kości zależne od jej naprężenia [19, 38,39]. Nazwał je piezoelektrycznością (ryc. 1). Basset badając polaryzację kości pod wpływem odkształcenia stwierdził, że w miejscu jej ściskania powstają ładunki ujemne, zaś w miejscu rozciągania dodatnie [2,3].

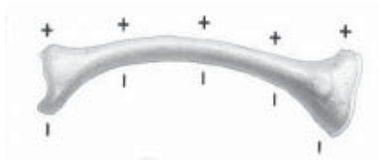
W kości występują także nie stresowe potencjały spoczynkowe, które zostały po raz pierwszy opisane przez Friedenberga i Brightona w 1966 roku [16,17, 18]. Efektem ich obecności jest powstanie w miejscach aktywnego zrostu ujemnego ładunku elektrycznego, pomimo braku działania sił mechanicznych. Stwierdzono, że obciążenie dynamiczne kości silniej pobudza gojenie kości niż obciążenie statyczne [13]. Proces osteogenezy postępuje przy obciążeniu uginającym kość o co najmniej 0,4% jej długości np. dla kości udowej dorosłego człowieka wynosi 2 mm, a cykl ten musi być powtarzany częściej niż 0,5 Hz, czyli co 2 sekundy [33]. Mechanizm pobudzający gojenie kości wywołany obciążeniem mechanicznym nie został w pełni wyjaśniony. Poglądy na ten temat zmieniały się kilkakrotnie. Riggins i współpracownicy w swoich badaniach w 1977 roku nie zaobserwowali różnicy w jakości powstającego zrostu u szczurów w zależności od obciążenia kończyny [14]. Najnowsze doniesienia próbują wyjaśnić wpływ sił mechanicznych na regenerację kości na poziomie komórkowym. W 2003 roku Petrov i Pollack zaobserwowali, że powtarzane obciążenie stymuluje przepływ płynu kanalikowego wewnątrz osteocytów oraz wzdłuż ich wypustek komórkowych [30]. W przypadku niewystarczającego przepływu jonów osteocyty podtrzymują resorpcję osteoklastyczną, natomiast przy przepływach o większej intensywności, osteocyty podtrzymują tworzenie kości przez osteoblasty. Kenwright i Goodship w randomizowanych badaniach 102 złamań kości piszczelowej zespolonych stabilizatorem ze-

38,39]. Yasuda named the potential "piezoelectricity" (Fig. 1). Basset concluded after his studies on polarity of the bone undergoing deformation, that compression gives a negative charge while tensile forces evoke positive charge on the bone [2,3].

Non-stress resting potential in the bones was described first by Friedenberg and Brighton, 1966 [16,17,18]. This potential is present as a negative charge in the place of active bone healing process of a fractured bone despite lack of mechanical forces. Dynamic load of a bone was discovered as more stimulating healing processes than static loads [13]. Osteogenesis proceeds when bone deflection reaches 0,4% of its length – meaning 2mm for an average adult's femur, in 0,5Hz cycles, i.e. every 2 seconds [33]. Mechanism of healing processes stimulation through mechanical loading is not fully discovered. Hypotheses on this item changed with time. Riggs et al. in their studies in 1977 observed no differences in the quality of a union referring to load of extremity in rats [14]. In the newest articles, their authors try to explain the influence of mechanical forces on bone regeneration on cellular level. Petrov and Pollack in 2003 observed that repeated mechanical loading stimulates flow of canalicular fluid inside osteocyte and along its appendices [30]. When the flow is "insufficient" osteocytes force osteoclastic activity, meanwhile more intensive flows stimulate osteogenesis in osteoblasts. Kenwright and Goodship observed in a randomized trial of 102 fractures of tibia, after external stabilization, positive effect of bearing of the bone on healing [24]. Even though it is important to remember that to early or to intensive loading may injure new created callus resulting in nonunion. Estimation of optimal bearing and its application during healing of the bone is difficult and demands close cooperation of patient and surgeon.

Electric stimulation not only accelerates regeneration of bony tissue but also diminishes pain in the fracture, as well as inflammatory reaction and improves peripheral blood circulation. Some data suggest bacteriostatic activity of electric stimulation.

Failures in the treatment of the fractures like delayed union, nonunion, turned many clinicians to study physiological processes during bone regeneration to seek for novel effective methods of bone stabilization and accessory ones stimulating bone regeneration [8].



Ryc 1. Rozkład ładunków elektrycznych podczas ściskania i rozciągania kości.

Fig. 1. Distribution of the electric charges in tensile and compressive bone deformation.

wnętrznym zaobserwowali dodatni wpływ obciążenia operowanej kończyny na proces regeneracji kości [24]. Należy jednak pamiętać, że przy zbyt dużym i wczesnym obciążaniu może dojść do uszkodzenia powstającej kostniny oraz braku zrostu. Określenie optymalnego obciążenia i jego powtarzalności w trakcie gojenia kości jest bardzo trudne i wymaga ścisłej współpracy chorego z lekarzem.

Elektrostymulacja nie tylko przyspiesza zrost tkanki kostnej, lecz działa także przeciwbólowo w miejscu urazu, zmniejsza odczyn zapalny i poprawia krążenie obwodowe. Istnieją również doniesienia o działaniu hamującym rozwój drobnoustrojów.

Niepowodzenia w leczeniu złamań pod postacią opóźnionego zrostu czy stawów rzekomych skłoniły wielu klinicystów do badania zjawisk zachodzących podczas fizjologicznego procesu gojenia kości oraz poszukiwania nowych, skutecznych metod leczenia zaburzeń zrostu. Efektem tych prac stało się opracowanie wielu nowoczesnych metod stabilizacji miejsca złamania oraz metod wspomagających i stymulujących procesy zrostu [8].

ZASTOSOWANIE ELEKTROSTYMULACJI W PROCESACH GOJENIA KOŚCI

Aby odtworzyć kontrolowaną różnicę napięć na powierzchniach kości powstałych pod wpływem obciążenia mechanicznego można zastosować pole elektromagnetyczne. Na zjawisku piezoelektrycznym zostały oparte elektro- i magnetostymulacja. Pierwszą próbę zastosowania prądu elektrycznego do pobudzenia gojenia stawu rzekomego złamanej kości podudzia podjął w 1821 roku Hartshorne, opisując ten przypadek 20 lat później na łamach American Journal of Medicine [4, 5]. Lente w 1850 roku opisał 3 przypadki wyleczonego zrostu opóźnionego i stawu rzekomego poprzez stosowanie ogniwa galwanicznego [6,7]. W następnych latach ten sposób wspomagania gojenia kości został zarzucony. Momentem przełomowym stało się odkrycie zjawiska piezoelektrycznego kości w 1953 roku przez Yasudę [38,39]. Od momentu wykazania stymulującego wpływu prądu elektrycznego na kość, stosowane są następujące metody elektrostymulacji tkanki kostnej:

1. **inwazyjna** - wprowadzona przez Dwayera. W 1970 roku wykonał on operację polegającą na wszczepieniu elektrody ujemnej (katody) stymulatora w okolicę szczeliny złamania (ryc. 2) [15]. Pierwsze badania z zastosowaniem prądu stałego miały na celu określenie optymalnych jego parametrów dla pobudzenia regeneracji kości [16,17,18]. Friedenberg i Kohanim wykazali, że pod wpływem działania prądu stałego o natężeniu 1-20 mA dochodzi do nasilonej osteogenezy w pobliżu katody oraz nasilonej osteolizy w pobliżu anody. Stwierdzono, że proces osteogenezy w największym stopniu przyspiesza

APPLICATION OF ELECTRIC STIMULATION IN BONE HEALING

In order to reconstruct the controlled charge difference on the surface of the bones evoked in mechanical bearing electromagnetic field can be used. Both electric and magnetic stimulation are based on piezoelectric phenomenon. First use of electric current in stimulation of bone healing processes in pseudoarthrosis of the leg took place in 1821 (Hartshorne), and was published twenty years later in American Journal of Medicine [4,5]. Lente reported in 1850 3 cases of recovery of delayed union and pseudoarthrosis using galvanic circle [6,7]. In the next years this method was abandoned. Yasuda's discovery of piezoelectric current in the bones in 1953 was a breakthrough [38,39]. Since then two methods are used for electric stimulation of bones:

1. **invasive** – introduced by Dwayer. In 1970 he performed an operation of negative electrode (cathode) insertion into the fracture's gap (Fig. 2) [15]. First trials in the use of direct current were aimed at current parameterization for optimal stimulation of bone regeneration [16,17,18]. Friedenberg and Kohanim showed, that intensive osteogenesis is present in the proximity of cathode with 1-20mA direct current and intensive osteolysis occurs in proximity of the anode. Current strength of 20μA was found to be most adequate to accelerate osteogenesis. Variations of current strength below and above this value diminish the stimulating effect, while 50 μA current induces osteolysis [18]. Additionally, osteogenesis takes place in 0,5-1cm area around the cathode. That's why it should be designed as an applicable net to increase its power. Electric stimulation as a method of bone healing stimulation is estimated as 65-80% efficient by various authors [1,18]. This method needs operations of insertion and then evacuation of stimulator, which makes it less usable nowadays.
2. **semi-invasive** – Brighton's method, when the internal electrode, cathode is inserted into the bone in a proximity of the fracture, while anode is placed on the skin on the other side of the fracture's gap. This method was mostly used on animal models (Fig. 3), and in the humans in cases of nonunions of small bones.
3. **non-invasive** – with both electrodes placed externally on the skin, one on either side of the fracture's gap. Extracorporeal system produces electric potential externally. It's a most common method of electric stimulation of bones, because no invasive operation nor even percutaneous implantation of electrodes is required. Other non-invasive methods include magnetic field exposure, capacitively coupled electrical stimulation (CCEST) and low frequency ultrasound.

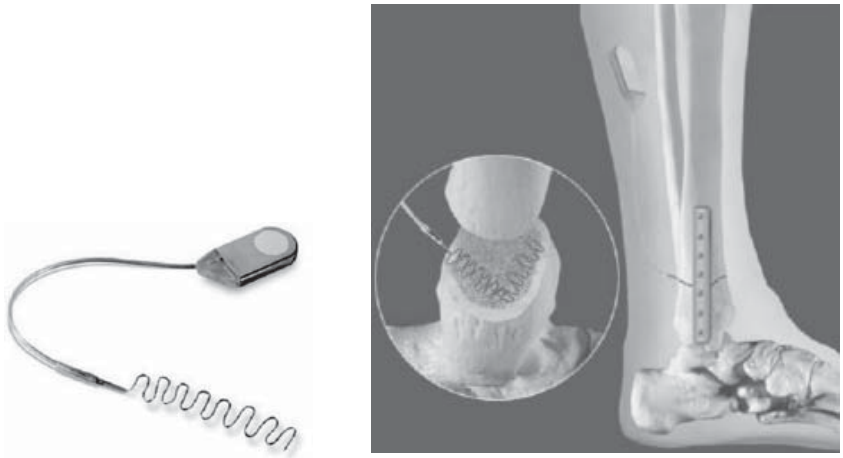
prąd o natężeniu 20 μA. Poniżej i powyżej tej wartości zmniejsza się wpływ prądu na kościotworzenie, a prąd o wartości 50 μA wywołuje osteolizę [18]. Stwierdzono również, że osteogeneza zachodzi tylko na obszarze od 0,5 do 1 cm wokół katody. Dlatego celem zwiększenia jej oddziaływania na komórki kości, powinna być zbudowana z siateczki. Skuteczność leczenia zaburzeń zrostu kości przy zastosowaniu stymulacji elektrycznej oceniana jest przez różnych autorów od 65 do 80% [1,18]. Metoda ta jednak wymaga wykonania zabiegów operacyjnych celem wszczepienia i usunięcia stymulatora. Dlatego obecnie jest bardzo rzadko stosowana.

2. **półinwazyjna -** opisana przez Brightona, w której stosuje się elektrodę wewnętrzną - katodę (umieszczoną w kości w pobliżu miejsca złamania) i zewnętrzną - anodę (umieszczoną na skórze) po przeciwległych stronach szczeliny złamania. Metoda ta była głownie stosowana na materiale zwierzęcym (ryc. 3). U ludzi natomiast do leczenia braku zrostu kości łódeczkowatej.

Basset et al. described in 1974 application of magnetic field (PEMF) in nonunion cases [2,3]. Controversies were born around this method throughout the years. Method's efficacy was proven in 1998 by Ryaby, who observed electromagnetic wave stimulating in vitro osteoblasts' secretion of bone morphogenetic proteins: BMP 2 and 4 [34]. Electric stimulation in the proximity of the fracture or bone discontinuity causes hyperaemia of tissues and induces angiogenesis. Electric charges influence deposition of calcium ions in the bones. The alkaline pH increase and activity of osteoclasts thus falls meanwhile osteoblasts' reconstructive activity is higher [32]. Sieroń found out that action of magnetic field may depend on its influence on certain growth factors, especially IGF-II and TGF–β [35]. Major advantages of the method are non-invasive and external application of stimulating electrodes, even on a plaster dressing (Fig. 4). Optimal electromagnetic field therapy is 10 hours daily, for longer exposure does not improve the results (22). A 95% efficacy of treat-

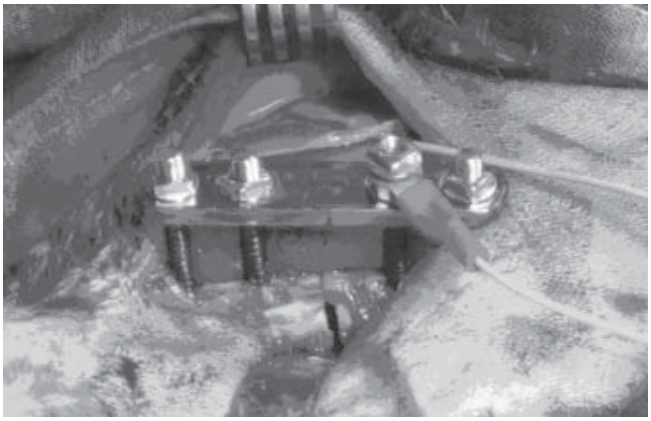
Ryc. 2. External view of the invasive stimulator and its implantation.

Fig. 2. External view of the invasive stimulator and its implantation.



Ryc. 3. Zastosowanie półinwazyjnej stymulacji elektrycznej zrostu kości w warunkach doświadczalnych po zespoleniu kości udowej królika.

Fig. 3. Experimental application of the semi-invasive stimulator of bone healing processes in fracture rabbit femur.



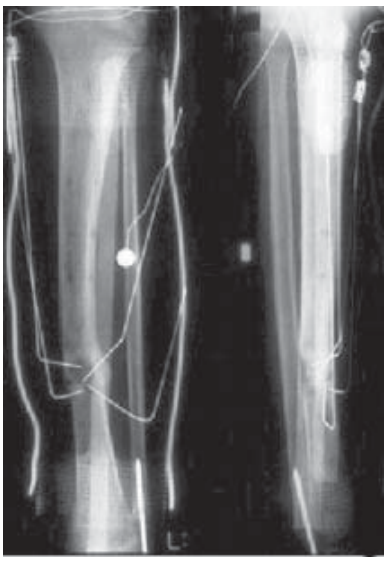
3. **nieinwazyjna -** w której stosuje się dwie elektrody zewnętrzne, które umieszcza się na skórze po przeciwległych stronach szczeliny złamania. Układ położony zewnętrznie, poza organizmem chorego, indukuje potencjał elektryczny. Obecnie tego typu stymulatory stosowane są najczęściej, ponieważ nie wymagają wykonania zabiegu operacyjnego i podskórnej implantacji elektrod. Do metod nieinwazyjnych zalicza się pole magnetyczne, prąd pojemnościowy oraz niskiej częstotliwości ultradzięki.

Zastosowanie pola magnetycznego (PEMF) w leczeniu braku zrostu zostało w 1974 roku opisane przez Basseta i współpracowników [2,3]. Przez wiele lat ta metoda terapii budziła wiele kontrowersji. Dopiero w 1998 roku skuteczność pola elektromagnetycznego w leczeniu zaburzeń zrostu kości została potwierdzona w badaniach *in vitro* przez Ryaby'ego. Zaobserwował on, że fale elektromagnetyczne pobudzają wydzielanie przez osteoblasty aktywnych substancji m.in. białek morfogenetycznych kości: BMP 2 i 4 [34]. Zastosowanie elektrostymulacji w pobliżu miejsca urazu i przerwania ciągłości tkanki kostnej powoduje również zwiększenie ukrwienia uszkodzonych tkanek i aktywuje proces angiogenezy. Ładunki elektryczne wpływają również na deponowanie jonów wapnia w kości. Pod wpływem zastosowanej elektrostymulacji dochodzi do wzrostu pH w tkankach, co zmniejsza aktywność komórek osteoklastycznych i powoduje wzrost aktywności osteoblastów – komórek odbudowujących tkankę kostną [32]. Sieroń stwierdził, że oddziaływanie wolnozmiennego pola magnetycznego na procesy osteogenezy może mieć związek z jego wpływem na wybrane czynniki wzrostu, zwłaszcza IGF-II oraz TGF-ß [35]. Zaletą tej metody jest nieinwazyjność i możliwość umieszczenia elektrod stymulatora na opatrunkach unieruchamiających złamanie (ryc. 4). Optymalny czas terapii polem elektromagnetycznym wynosi 10 godzin

ment was observed by Basset et al., after auto- or alloplasty of pseudoarthrosis with subsequent exposure to electromagnetic field [2].

Brighton and Pollack used CCEST in fractures for the first time in 1985 [4,5]. A variable electric field is created between the electrodes placed directly on patient skin on either side of a fracture and stimulates osteogenesis. Mechanisms of this field's action on osteoblasts were presented in 2001 by Brighton [6,7]. He discovered that capacitively coupled electrical field changes potential on osteoblast's cellular membrane, which rises membrane's calcium ions permeability and intracellular calcium and calmoduline concentration [6,7]. This promotes proliferation of osteoblasts. Efficacy of variable electric field in bone regeneration is estimated as 60-89% [4,5,9].

Methods of electric and electromagnetic stimulation in disturbed healing processes of bones and ultrasound stimulation of acute fractures were studied and validated for the use in bone healing acceleration [11,12,13]. In the clinical trials all three methods of stimulation gave cellular and molecular evidences on their stimulating potential in cells proliferation and differentiation as well as osteosynthesis [23,25,26,29]. Many articles are published about the influence and efficacy of electric current in bone healing in Polish and foreign newspapers.



Ryc. 4. Zastosowanie elektrostymulatora w leczeniu zaburzeń zrostu kości piszczelowej.

Fig. 4. Electric treatment of tibial bone healing disturbances.

dziennie, a dalsze jego wydłużanie nie przyspiesza gojenia złamania [22]. Bassett i współpracownicy uzyskali zrost kostny u 95% chorych, u których wykonano plastykę stawu rzekomego z użyciem kości auto- lub allogennej oraz zastosowano pole magnetyczne [2].

Brighton i Pollack w 1985 roku w czasie leczenia złamań po raz pierwszy użyli prądu pojemnościowego [4, 5]. Pomiędzy elektrodami położonymi bezpośrednio na powierzchni skóry po przeciwnych stronach na wysokości szpary przełomu powstaje zmienne pole elektryczne, które pobudza procesy osteogenezy. Mechanizm jego działania na osteoblasty przedstawił Brighton w 2001 roku [6,7]. Dowiódł on, iż pojemnościowe pole elektryczne wywołuje zmianę napięć na powierzchni błony osteoblastów. Powoduje to wzrost: przepuszczalności kanałów wapniowych, wewnątrzkomórkowego stężenia wapnia oraz poziomu kalmoduliny [6,7]. W wyniku tego, pobudzeniu ulega proliferacja osteoblastów. Skuteczność zmiennego pola elektrycznego w leczeniu zaburzeń regeneracji kości oceniana jest według różnych autorów od 60 do 89% [4,5,9].

Metody stymulacji elektrycznej i elektromagnetycznej w zaburzeniach zrostu oraz stymulacja ultradźwiękowa świeżych złamań kości zostały zbadane i ocenione pod kątem możliwości przyspieszania procesu gojenia [11,12,13]. W przeprowadzonych badaniach klinicznych wszystkie trzy metody stymulacji doprowadziły do uzyskania komórkowych i molekularnych dowodów potwierdzających ich oddziaływanie w procesie stymulacji, proliferacji i różnicowania komórek oraz tworzenia zrostu kości [23,25,26,29]. Obecnie w piśmiennictwie polskim i zagranicznym istnieje wiele prac opisujących badania oraz wyniki leczenia wpływu prądu elektrycznego na stymulację zrostu kostnego.

ZASTOSOWANIE ELEKTROSTYMULACJI W PROCESACH GOJENIA TKANEK MIĘKKICH I USPRAWNIANIU PACJENTÓW

Elektroterapią nazywa się dział lecznictwa fizykalnego, w którym do celów leczniczych wykorzystuje się prąd stały oraz prądy impulsowe małej i średniej częstotliwości.

Najczęściej w leczeniu wykorzystuje się następujące zabiegi:

- **Galwanizacja** – zabieg wykonywany jest za pomocą prądu stałego. Elektrody podłączone do źródła prądu umieszcza się w odpowiednich miejscach na skórze. Działanie lecznicze polega na zmniejszeniu pobudliwości nerwów oraz działaniu przeciwzapalnym wykorzystywanym w leczeniu nerwobólów, przewlekłych zapaleń nerwów, splotów i korzeni nerwowych, tkanek miękkich, zespołów bólowych w przebiegu choroby zwyrodnieniowej stawów kręgosłupa oraz wypadnięcia krążka międzykręgowego. Wywołane przekrwienie naczyń pomaga w leczeniu porażeń wiotkich oraz zaburzeń krążenia obwodowe-

ELECTRIC STIMULATION IN SOFT TISSUES REPAIR AND IN PATIENTS' REHABILITATION

Electrotherapy is a branch of physical therapeutics, where direct current and impulses of low and medium-frequency currents are used.

Most often used electrotherapeutic methods are:

- Galwanization – a therapy, where direct current is used. The electrodes are connected to a source of current and placed properly on the skin. Therapeutic action is through diminishing nerves' excitability and anti-inflammatory activity mostly in neuralgiae, chronic nerve or plexuses inflammations, chronic radiculitis, soft tissues pains, vertebral degenerative arthroses, intervertebral disc prolapse. The evoked hyperaemia helps in treatment of flaccid palsies and peripheric circulatory disorders. Longitudinal galvanization is used in disturbed regrowth after bone fractures.
- Electro-aqueous immersion – kind of galvanization where ionic charges move in aqueous solutions. The treated extremities are immersed in a bath-tube pluuged to direct current (two or four chambered bath is used)
- Ionophoresis or iontophoresis (i.e. ionic medication) – healing ions are transferred into the soft tissues with the use of electric field. Chemicals undergoing electrolytic dissociation are used only. Direct current is used for transdermal transfer of drugs like lidocaine, hydrocortisone, iodine, calcium. Lidocaine iontophoresis is administered in patients with ischialgiae, back pains, arthritis. Hydrocortisone is mainly used in dermatitis, soft tissues, small joints and tendovaginal injuries. Scar hypertrophy (keloids), scar contractions are treated with iodine while Sudeck's syndrome and regrowth failure with calcium. Analgetic, anti-inflammatory or myorelaxation is strictly drug detrmined.
  Progress and development in electronics introduced into physical medicine modern devices producing different electric currents of low frequency. Different currents characteristics give different biologic effects (Fig. 5).
- Electric stimulation of muscles – pulsatile current (i.e. intermittent) is used for muscular and neuronal stimulation. Electrodes are put on the skin in the so called electromotoric points. Such therapy causes muscular contractions preventing from muscular atrophies and revalidating affected muscles. During an impulsation muscles contract and relax or rest. Muscular electrostimulation is most often performed on the groups of muscles affected by palsy of their motoric innervation. The aim of this therapy is strengthening muscular force and mass, enhancement of peripheral circulation and elimination of supplementary movements, which hinders patient's rehabilitation. For pulsatile current massage Trabert's

go. Galwanizacje podłużną stosuje się po złamaniach kości w przypadkach zaburzeń zrostu.

- **Kąpiele elektryczno-wodne** – są odmianą galwanizacji polegającą na przepływie ładunków elektrycznych w środowisku wodnym. Leczone kończyny zanurza się w wannie podłączonej do źródła prądu stałego (kąpiel dwu- lub czterokomorowa).
- **Jonoforeza** lub jontoforeza – Zabieg polegający na wprowadzeniu jonów działających leczniczo do tkanek miękkich siłami pola elektrycznego. Do jonoforezy mogą być używane wyłącznie związki chemiczne, które ulegają dysocjacji elektrolitycznej. Celem wprowadzenia przez skórę leków, np. lidokainy, hydrokortyzonu, jodu czy wapnia, wykorzystuje się prąd stały. Jonoforezę z użyciem lidokainy stosuje się w nerwobólach, zespołach rwy kulszowej, bólach kręgosłupa oraz stawów. Jonoforezę z użyciem hydrokortyzonu stosuje się w stanach zapalnych skóry, urazach tkanek miękkich drobnych stawów i pochewek ścięgnistych. Jod wykorzystuje się w przerośniętych bliznach i przykurczach bliznowatych a wapń w przypadku utrudnionego zrostu kości i zespole Sudecka. W zależności od zastosowanego leku uzyskuje się działanie przeciwbólowe, przeciwzapalne oraz zmniejszenie napięcia mięśni. Postęp i rozwój elektroniki umożliwił wprowadzenie do lecznictwa fizykalnego nowoczesnych aparatów wytwarzających różnego rodzaju prądy elektryczne małej częstotliwości. Prądy te cechują się odmienną charakterystyką i różnym działaniu biologicznym (ryc. 5).
- **Elektrostymulacja mięśni** – do stymulacji mięśni i nerwów wykorzystywany jest prąd impulsowy (płynący z przerwami). Elektrody umieszcza się na skórze, w odpowiednich miejscach, zwanych punktami elektromotorycznymi. Celem takich zabiegów jest pobudzenie mięśni do skurczu, co zapobiega ich zanikom oraz usprawnia upośledzone grupy mięśniowe. W trakcie przepływu prądu impulsowego mięśnie kurczą się i odpoczywają. Najczęściej wykonuje się elektrostymulację mięśni porażonych, w których

current is used, causing muscles fibrillation of 140Hz and causing their relaxation. This current is used mainly in arthroses (joint degeneration), back pain syndromes, neuralgiae, post-traumatic muscular pains, diseases with risen muscular tonus or peripheral circulatory impairment.

- FES – Functional electrical stimulation. Muscles are irritated with a series of impulses at a certain phase of a movement. It is predominantly used in peroneal nerves stimulation in reeducation of walking after a hemiplegic or hemiparetic patients. Currently studies are run on the use of FES stimulation in the patients affected by spinal injury and bipedal palsy, the so called multi-channel FES with proper synchronization of muscular groups pacing, imitating a correct walking action.
- TENS – Transcutaneous electrical nerve stimulation, where rectangular, triangular or sinusoid currents of 0.5-150Hz are used. Application of low strength currents evokes prickling or vibrating sensation below pain feeling level. TENS is applied to fight post-traumatic pains, after peripheral nerve injuries and in aching places – trigger points (places on bodies causing pains).
- HV – High voltage, a short timed triangular current of high amplitude; up to 500V, 1-125Hz. Short time of an impulse (20-100μs) allows for so high amplitude. These currents are used wound healing and fighting edemas with relatively high efficacy. Such type of stimulation additionally acts as an analgetic agent, massages the muscles and relaxes. For more effective pain relief polarity of the electrodes is changed every few minutes.
- MES – Microamper electric stimulation, pulsatile current strength is low as few μA. It supports natural electromotoric forces causing ionic currents in the organism. Thus MES therapy is mainly used in diseases with impaired natural ionic flow. It also causes natural electrochemical reactions. Treatment with these currents gives pain relief and better healing.

Ryc. 5. Zastosowanie elektrostymulacji w leczeniu bólu.

Fig. 5. Analgesic electric stimulation.

doszło do uszkodzenia nerwów odpowiedzialnych za wywołanie skurczu. Zabiegi elektrostymulacji mają na celu wzmocnienie siły i masy mięśniowej, poprawę krążenia obwodowego oraz eliminację ruchów zastępczych, które utrudniają usprawnianie chorego. Do masażu prądem bodźcowym wykorzystuje się prąd impulsowy Traberta, który wprowadza mięśnie w drżenie o częstotliwości ok. 140 Hz i powoduje ich rozluźnienie. Prąd ten najczęściej jest stosowany w chorobach zwyrodnieniowych stawów, zespołach bólowych kręgosłupa, nerwobólach, pourazowych bólach mięśniowych, stanach przebiegających ze wzmożonym napięciem mięśni i zaburzeniach krążenia obwodowego.

- **FES** – do tego typu elektrostymulacji czynnościowej wykorzystywany jest prąd impulsowy o małej częstotliwości. Mięśnie pobudzane są do skurczu serią impulsów wyzwalanych w określonej fazie ruchu. Tego typu zabiegi najczęściej stosuje się do stymulacji nerwu strzałkowego celem reedukacji chodu u osób z niedowładem lub porażeniem połowiczym. Obecnie trwają badania nad wykorzystaniem elektrostymulacji FES u osób z uszkodzeniem rdzenia kręgowego i porażeniem kończyn dolnych, tzw. FES wielokanałowa polegająca na odpowiednio zsynchronizowanej w czasie stymulacji grup mięśni imitując ich prawidłową pracę podczas chodu.
- **TENS - Przezskórna stymulacja elektryczna** – do tego rodzaju elektroterapii stosuje się prądy impulsowe małej częstotliwości, o przebiegu prostokątnym, trójkątnym lub sinusoidalnym i częstotliwościach od 0,5 do 150 Hz. Podczas zabiegów stosuje się prąd o niskim natężeniu, poniżej progu bólowego, co wywołuje wyraźne uczucie mrowienia i wibracji. Stymulację TENS najczęściej wykorzystuje się do zwalczania bólu pourazowego, po przebytych uszkodzeniach nerwów obwodowych oraz punktach bólowych (miejscach na ciele wywołujących ból „trigger points”).
- **Prądy wysokonapięciowe HV** - stosowany jest podwójny impuls trójkątny o krótkim czasie trwania i wysokiej amplitudzie. Napięcie prądu dochodzi do 500 V a częstotliwość mieści się w zakresie 1-125 Hz. Krótki czas trwania impulsu (20-100 μs) pozwala na zastosowanie tak dużej amplitudy. Najczęściej zabiegi te stosowane są w leczeniu ran i obrzęków i charakteryzują się stosunkowo dużą skutecznością. Ponadto stymulacja powoduje działanie przeciwbólowe, masaż mięśnia oraz jego rozluźnienie. Celem uzyskania silniejszego działania przeciwbólowego w trakcie zabiegu co kilka minut zmienia się polaryzacje.
- **Stymulacja mikroamperowa MES** - wykorzystany w tej metodzie prąd impulsowy osiąga natężenie zaledwie kilku mikroamperów. Przepływ prądu mikroamperowego wspomaga działanie naturalnych sił elektromotorycznych, które powodują ruch jonów wewnątrz organizmu. Terapia MES ma szczególne

- DD – diadynamic current, known as Bernard current. In this therapy a direct current with an overlaid unilaterally rectified harmonic alternating current is used. Few kinds of currents are achieved: DF, MF, CP, LP, RS, MM, each of them having different tissue effect. Various electrodes are used, such as circle, point and platelet. Diadynamic currents force vasomotoric activity, facilitate blood supply to the tissues thus force tissue alimentation, repair and metabolism. They play a role in treatment of post-traumatic edemas and circulatory disorders. In their action upon skeletal muscles an isometric stimulation and secondarily hyperaemia and relaxation are observed. Diadynamic currents are mostly applied in pain syndromes relevant to joint degenerative diseases (arthroses), intervertebral disc syndromes, ischialgia, back pains, brachial plexus neuralgia, intercostals or trigeminal nerve neuralgia, periarthritic inflammations (like shoulder or elbow joint) as well as joints, muscles and ligaments laesions.
- Interferential currents – alternating current of medium frequency generated in two circuits of different current frequencies. An interference of the currents occurs in the tissues after proper placing of electrodes on patient’s skin. The frequency difference varies 0-100Hz. Therapeutic effect depends on set currents frequencies and is of either analgesic or circulation enhancing or muscular gymnastic or sympathetic nervous system relaxing value.

znaczenie w przypadku stanów chorobowych powodujących zaburzenie naturalnego ruch jonów w organizmie. MES wywołuje również typowe zjawiska elektrochemiczne. Stosowanie tego typu prądów ma działanie przeciwbólowe oraz wspomaga gojenie.

- **Prądy diadynamiczne DD** - zwane inaczej prądami Bernarda. Do terapii wykorzystywany jest prąd stały, na który nałożony jest jednopołówkowo wyprostowany prąd sinusoidalnie zmienny (prostowanie prądu sinusoidalnie zmiennego). W ten sposób uzyskuje się kilka postaci prądów, np.: DF, MF, CP, LP, RS oraz MM, które mają odmienne działanie na poszczególne tkanki. Do terapii wykorzystuje się elektrody cyrklowe, punktowe lub płytkowe. Prądy DD powodują wzrost aktywności naczynioruchowej, polepszają ukrwienie tkanek i tym samym usprawniają procesy odżywiania i przemiany materii. Odgrywa to istotną rolę w leczeniu obrzęków powstałych po urazach oraz zaburzeń ukrwienia obwodowego. Działając na mięśnie szkieletowe powodują izometryczną stymulację i w końcowym efekcie ich przekrwienie oraz obniżenie napięcia. Prądy diadynamiczne najczęściej stosuje się do leczenia zespołów bólowych w przebiegu choroby zwyrodnieniowej stawów, bólów pleców i kręgosłupa, zespołu rwy kulszowej, chorobach krążka międzykręgowego, nerwobólach splotu ramiennego, nerwu międzyżebrowego i trójdzielnego, zapaleniach okołostawowych np. stawu ramiennego, łokciowego. Terapia wykorzystywana jest również po urazach stawów, mięśni oraz ścięgien.
- **Prądy interferencyjne** - wykorzystywany jest prąd zmienny o średniej częstotliwości i generowany z aparatu w dwóch obwodach różniących się częstotliwością prądu. Po odpowiednim ułożeniu dwóch par elektrod na skórze, dochodzi do interferencji prądu wewnątrz tkanek. Powstała różnica w częstotliwości między obwodami wynosi od 0 do 100 Hz. Efekt terapeutyczny uzależniony jest od częstotliwości generowanego prądu i wywołuje działanie przeciwbólowe, zwiększa krążenie obwodowe, powoduje gimnastykę mięśni oraz zmniejsza napięcie współczulnego układu nerwowego.

Piśmiennictwo:

1. *Bara T., Synder M., Studniarek M.: Zastosowanie fal wstrząsowych w leczeniu zrostów opóźnionych i stawów rzekomych kości długich. Ortop Traum Rehab. 2000, 4: 11-14.*
2. *Basset C.A.: The development and application of pulsed electromagnetic fields for ununited fractures and arthrodeses. Orthop Clin North Am. 1984, 15: 60-65.*
3. *Bassett C.A., Pawluk R.J., Pilla A.A.: Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields. Science. 1974, 184 (136): 575-7.*
4. *Brighton C.T., Friedenberg Z.B., Mitchell E.J., Booth R.E.: Treatment of non-unions with constant direct current. Clin. Orthop. 1977, 124: 106.*
5. *Brighton C.T., Pollack S.R.: Treatment of recalcitrant nonunion with a capacitively coupled electrical field. A preliminary report. J Bone Joint Surg. 1985, 67A: 577-585.*
6. *Brighton C.T., Shaman P., Heppenstall R.B., Esterhai J.L., Pollack S.R., Fridenberg Z.B.: Tibial Nonunion Treated with Direct Current, Capacitive Coupling, or Bone Graft, Clinical Orthopaedics and Related Research. 1995, 321: 223-234.*
7. *Brighton C.T., Wang W., Seldes R., Zhang G., Pollack S.: Signal transduction in electrically stimulated bone cells. J Bone Joint Surg. 2001, 83A: 1514-1523.*
8. *Cass C. A.: Some experiences of a battery stimulator in fractures with well estabilished non-union. J. Bone Jt. Surg. 1975, 57-B: 251-258.*
9. *Chen Y.J., Wurtz C.J., Wang C.J., Kuo Y.R., Yang K.D., Huang H.C., Wang F.S.: Recruitment of mesenchymal stem cells and expression of TGF – beta1 and VEGF in early stage of shock wave – promoted bone regeneration of segmental defect in rats. J Orthop Res. 2004, 22: 526-534.*
10. *Chi-Chuan W., Wen-Jer C.: A revised protocol for more clearly classifying a nonunion. J Orthop Surg. 2000, 8: 45-52.*
11. *Cieszyński T.: Bioelektryczne pobudzanie regeneracji tkanki kostnej u ludzi w przypadkach opóźnienia zrostu kostnego i stawów rzekomych, Chir. Narz. Ruchu Ortop. Pol. XXXV, 1979, 4: 507-511.*
12. *Cieszyński T.: Studies on the regeneration of ossal tissue. Influence of positive and negative electricity upon callus formation in humans. Arch. Immunol. Ther. Exp. 1964, 12: 269.*
13. *Connoly J.F., Ortise J., Price R., Bayuzick R.J.: The effect of electrical stimulation on the biophysical properties of fracture healing, Ann. N. Y. Acad. Sci. 1974, 238: 519-525.*
14. *Deszczyński J., Szczęsny G.: Proces zrostu kości – patofizjologia i zagadnienia kliniczne. Przebieg zrostu kostnego oraz czynniki fizyczne warunkujące jego wystąpienie. Ortop Traum Rehab. 2000, 4: 24-29.*
15. *Dwayer N., Matthews B.: The electrical response to stress in died, recently excised and living bone. Injury. 1970, 4: 279-284.*
16. *Friedenberg Z.B., Brighton C.T.: Biophysical induction of fracture repair. W: Lane JM (ed.) Fracture Healing, Churchill Livingstone. 1987.*
17. *Friedenberg Z.B., Brighton C.T.: Bioelectric potentials in bone. J Bone Joint Surg. 1966, 48A: 915-923.*
18. *Friedenberg Z.B., Harlow M.C., Happenstall R.B., Brighton C.T.: The cellular origin of bioelectric potentials in bone. Calcif. Tissue Res. 1972, 13: 53-59.*
19. *Fukada E., Yasuda I., On the piezzoelectric effect of bone. J. Physical Soc. 1957, 12: 1158.*
20. *Gaździk T.S.: Ortopedia i traumatologia. PZWL. 2001: 30-82.*
21. *Gaździk T.S.: Zakażenia w ortopedii. Urban&Partner. 2005: 4-166.*
22. *Hannouche D., Petite H., Sedel L.: Current trends in the enhancement of fracture healing. J Bone Joint Surg. 2001, 83: 157-164.*

References:

1. *Bara T., Synder M., Studniarek M.: Zastosowanie fal wstrząsowych w leczeniu zrostów opóźnionych i stawów rzekomych kości długich. Ortop Traum Rehab. 2000, 4: 11-14.*
2. *Basset C.A.: The development and application of pulsed electromagnetic fields for ununited fractures and arthrodeses. Orthop Clin North Am. 1984, 15: 60-65.*
3. *Bassett C.A., Pawluk R.J., Pilla A.A.: Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields. Science. 1974, 184 (136): 575-7.*
4. *Brighton C.T., Friedenberg Z.B., Mitchell E.J., Booth R.E.: Treatment of non-unions with constant direct current. Clin. Orthop. 1977, 124: 106.*
5. *Brighton C.T., Pollack S.R.: Treatment of recalcitrant nonunion with a capacitively coupled electrical field. A preliminary report. J Bone Joint Surg. 1985, 67A: 577-585.*
6. *Brighton C.T., Shaman P., Heppenstall R.B., Esterhai J.L., Pollack S.R., Fridenberg Z.B.: Tibial Nonunion Treated with Direct Current, Capacitive Coupling, or Bone Graft, Clinical Orthopaedics and Related Research. 1995, 321: 223-234.*
7. *Brighton C.T., Wang W., Seldes R., Zhang G., Pollack S.: Signal transduction in electrically stimulated bone cells. J Bone Joint Surg. 2001, 83A: 1514-1523.*
8. *Cass C. A.: Some experiences of a battery stimulator in fractures with well estabilished non-union. J. Bone Jt. Surg. 1975, 57-B: 251-258.*
9. *Chen Y.J., Wurtz C.J., Wang C.J., Kuo Y.R., Yang K.D., Huang H.C., Wang F.S.: Recruitment of mesenchymal stem cells and expression of TGF – beta1 and VEGF in early stage of shock wave – promoted bone regeneration of segmental defect in rats. J Orthop Res. 2004, 22: 526-534.*
10. *Chi-Chuan W., Wen-Jer C.: A revised protocol for more clearly classifying a nonunion. J Orthop Surg. 2000, 8: 45-52.*
11. *Cieszyński T.: Bioelektryczne pobudzanie regeneracji tkanki kostnej u ludzi w przypadkach opóźnienia zrostu kostnego i stawów rzekomych, Chir. Narz. Ruchu Ortop. Pol. XXXV, 1979, 4: 507-511.*
12. *Cieszyński T.: Studies on the regeneration of ossal tissue. Influence of positive and negative electricity upon callus formation in humans. Arch. Immunol. Ther. Exp. 1964, 12: 269.*
13. *Connoly J.F., Ortise J., Price R., Bayuzick R.J.: The effect of electrical stimulation on the biophysical properties of fracture healing, Ann. N. Y. Acad. Sci. 1974, 238: 519-525.*
14. *Deszczyński J., Szczęsny G.: Proces zrostu kości – patofizjologia i zagadnienia kliniczne. Przebieg zrostu kostnego oraz czynniki fizyczne warunkujące jego wystąpienie. Ortop Traum Rehab. 2000, 4: 24-29.*
15. *Dwayer N., Matthews B.: The electrical response to stress in died, recently excised and living bone. Injury. 1970, 4: 279-284.*
16. *Friedenberg Z.B., Brighton C.T.: Biophysical induction of fracture repair. W: Lane JM (ed.) Fracture Healing, Churchill Livingstone. 1987.*
17. *Friedenberg Z.B., Brighton C.T.: Bioelectric potentials in bone. J Bone Joint Surg. 1966, 48A: 915-923.*
18. *Friedenberg Z.B., Harlow M.C., Happenstall R.B., Brighton C.T.: The cellular origin of bioelectric potentials in bone. Calcif. Tissue Res. 1972, 13: 53-59.*
19. *Fukada E., Yasuda I., On the piezzoelectric effect of bone. J. Physical Soc. 1957, 12: 1158.*
20. *Gaździk T.S.: Ortopedia i traumatologia. PZWL. 2001: 30-82.*
21. *Gaździk T.S.: Zakażenia w ortopedii. Urban&Partner. 2005: 4-166.*
22. *Hannouche D., Petite H., Sedel L.: Current trends in the enhancement of fracture healing. J Bone Joint Surg. 2001, 83: 157-164.*

23. *Hartshorne E.: On the causes and treatment of pseudarthroses and especially that form of it sometimes called supernumerary joint. Am. J. Med. 1841, 1: 121-156.*
24. *Kenwright J., Goodship A.: Controlled mechanical stimulation in the treatment of tibial fractures. Clin Orthop. 1988, 241: 36-47.*
25. *Kostrzewski K., Łukasik S.: Stymulacja prądem elektrycznym zmiennym w leczeniu powikłań zrostu kostnego złamań trzonu kości długich, Chir. Narz. Ruchu Ortop. Pol. 1979, 2: 121-124.*
26. *Lente R.W.: Cases of un-united fracture treated by electricity. New York State J. Med. 1850, 5: 317-319.*
27. *Lieberman J.R., Duluiski A., Einhorn T.A.: Current concepts review. The role of growth factors in the repair of bone. J Bone Joint Surg. 2002, 84: 1032-1044.*
28. *Ohlsson C., Bengtsson B.A., Isaksson O.G., Andreassen T.T., Slootweg M.C.: Growth hormone and bone. Endocrine rev. 1998, 19: 55-79.*
29. *Otter M.W., McLeod K.J., Rubin C.T.: Effects of electromagnetic fields in experimental fracture repair. Clin Orthop. 1998, (Suppl. 355): 90-104.*
30. *Petrov N., Pollack S.: Comparative analysis of diffuse and stress induced nutrient transport efficiency in the lacunar-canalicular system of osteons. Biorheology. 2003, 40: 347-353.*
31. *Ramotowski.: Leczenie powikłań zrostu kostnego. PZWL. 1984, 13-96.*
32. *Rijal K.P., Kashimoto O., Sakurai M.: Effect of Capacitively Coupled Electric Fields on an Experimental Model of Delayed Union of Fracture, Journal of Orthopaedic Research. 1994, 12: 262-267.*
33. *Rubin C., Lanyon L.: Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. Calcif Tissue Int. 1985, 37: 411-417.*
34. *Ryaby J.T.: Clinical effects of electromagnetic and electric fields on fracture healing. Clin Orthop. 1998, S335: 205-215.*
35. *Sieroń A.: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie. ?-medica press. 2002, 132-135.*
36. *Skinner H.: Current diagnostic and treatment in orthopaedics. The McGraw-Hill Companies. 2003, 2-449.*
37. *Tylman D., Dziak A.: Traumatologia narządu ruchu, PZWL. 1987: 264-307.*
38. *Yasuda I., Fundamental aspects of fracture treatment. J. Kyoto Med Assoc. 1953, 4: 395.*
39. *Yasuda I., Noguchi K.: Dynamic callus and electric callus. J Bone Joint Surg. 1955, 37A: 1292-1297.*

23. *Hartshorne E.: On the causes and treatment of pseudarthroses and especially that form of it sometimes called supernumerary joint. Am. J. Med. 1841, 1: 121-156.*
24. *Kenwright J., Goodship A.: Controlled mechanical stimulation in the treatment of tibial fractures. Clin Orthop. 1988, 241: 36-47.*
25. *Kostrzewski K., Łukasik S.: Stymulacja prądem elektrycznym zmiennym w leczeniu powikłań zrostu kostnego złamań trzonu kości długich, Chir. Narz. Ruchu Ortop. Pol. 1979, 2: 121-124.*
26. *Lente R.W.: Cases of un-united fracture treated by electricity. New York State J. Med. 1850, 5: 317-319.*
27. *Lieberman J.R., Duluiski A., Einhorn T.A.: Current concepts review. The role of growth factors in the repair of bone. J Bone Joint Surg. 2002, 84: 1032-1044.*
28. *Ohlsson C., Bengtsson B.A., Isaksson O.G., Andreassen T.T., Slootweg M.C.: Growth hormone and bone. Endocrine rev. 1998, 19: 55-79.*
29. *Otter M.W., McLeod K.J., Rubin C.T.: Effects of electromagnetic fields in experimental fracture repair. Clin Orthop. 1998, (Suppl. 355): 90-104.*
30. *Petrov N., Pollack S.: Comparative analysis of diffuse and stress induced nutrient transport efficiency in the lacunar-canalicular system of osteons. Biorheology. 2003, 40: 347-353.*
31. *Ramotowski.: Leczenie powikłań zrostu kostnego. PZWL. 1984, 13-96.*
32. *Rijal K.P., Kashimoto O., Sakurai M.: Effect of Capacitively Coupled Electric Fields on an Experimental Model of Delayed Union of Fracture, Journal of Orthopaedic Research. 1994, 12: 262-267.*
33. *Rubin C., Lanyon L.: Regulation of bone mass by mechanical strain magnitude. Calcif Tissue Int. 1985, 37: 411-417.*
34. *Ryaby J.T.: Clinical effects of electromagnetic and electric fields on fracture healing. Clin Orthop. 1998, S335: 205-215.*
35. *Sieroń A.: Zastosowanie pól magnetycznych w medycynie. ?-medica press. 2002, 132-135.*
36. *Skinner H.: Current diagnostic and treatment in orthopaedics. The McGraw-Hill Companies. 2003, 2-449.*
37. *Tylman D., Dziak A.: Traumatologia narządu ruchu, PZWL. 1987: 264-307.*
38. *Yasuda I., Fundamental aspects of fracture treatment. J. Kyoto Med Assoc. 1953, 4: 395.*
39. *Yasuda I., Noguchi K.: Dynamic callus and electric callus. J Bone Joint Surg. 1955, 37A: 1292-1297.*

- Received: 19.07.2006
- Accepted: 04.09.2006
- Published: 06.09.2006