

Technika śledzenia markerów akustycznych 2D i 3D: zastosowanie kliniczne

2D and 3D speckle tracking echocardiography: clinical application

Ewa Szymczyk, Piotr Lipiec, Błażej Michalski, Jarosław D. Kasprzak

Katedra i Klinika Kardiologii, Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Szpital im. Władysława Biegańskiego, Łódź

WSTĘP

Wizualna ocena zaburzeń kurczliwości to jedno z trudniejszych zagadnień echokardiograficznych, wymagające duże doświadczenia. Półilościowa ocena kurczliwości związana bywa z różnicami w interpretacji między ekspertami oraz ze zmiennością interpretacji nawet przez tego samego echokardiografistę. Krokiem ku obiektywizacji oceny regionalnej funkcji skurczowej jest wprowadzenie technik ilościowych, pozwalających na analizę odkształcenia (*strain*) i tempa odkształcenia (*strain rate*). Parametry te można oceniać za pomocą echokardiografii [tkankowa echokardiografia dopplerowska (TDE), technika śledzenia markerów akustycznych (STE)], sonomikrometrii, tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego (MRI) z opcją znakowania [1]. Odkształcenie wyrażane jest w procentach i określa zmianę odległości między dwoma stałymi punktami tkanki mięśniowej w różnych okresach cyklu pracy serca w stosunku do ich położenia wyjściowego. Odkształcenie podłużne i okrężne przyjmują wartości ujemne, gdy dwa punkty zbliżają się do siebie, lub dodatnie, gdy oddalają się od siebie. Natomiast odkształcenie poprzeczne przyjmuje wartości dodatnie, gdy dwa punkty zbliżają się do siebie, lub ujemne, gdy oddalają się od siebie (ryc. 1). Tempo odkształcenia jest wyrażane natomiast jako odwrotność sekundy (s^{-1}) i stanowi różnicę prędkości dwóch punktów w badanym obszarze zainteresowania podzieloną przez odległość między tymi punktami (ryc. 2).

TKANKOWA ECHOKARDIOGRAFIA DOPLEROWSKA

Na początku lat 90. XX wieku Sutherland i wsp. [2] udowodnili, że metoda dopplerowska, stosowana dotychczas do oceny przepływu krwi w sercu i naczyniach, może być przydatna do pomiaru prędkości ruchu mięśnia sercowego dzięki zastosowaniu odpowiednich filtrów. Oceniana w ten sposób

prędkość poszczególnych obszarów miokardium była podstawowym parametrem, służącym do oceny regionalnej funkcji mięśnia sercowego, a następnie punktem wyjścia do obliczeń odkształcenia i tempa odkształcenia za pomocą przekształceń matematycznych. Najistotniejszym ograniczeniem analizy opartej na echokardiografii dopplerowskiej była zależność od kąta padania wiązki ultradźwięków, umożliwiającą rejestrację odkształcenia jedynie w osi równoległej, skutkującą możliwością analizy wyłącznie w obrębie części obrazowanych segmentów, odpowiednio zorientowanych przestrzennie w stosunku do wiązki ultradźwiękowej [3]. Problematyczne były również obliczenia dotyczące segmentów koniuszkowych. Metoda ta wydaje się również dość podatna na zakłócenia, wynikające z niedostatecznej jakości obrazu i zmienności wartości uzyskiwanych przez różnych badaczy lub nawet tego samego badacza.

TECHNIKA ŚLEDZENIA MARKERÓW AKUSTYCZNYCH

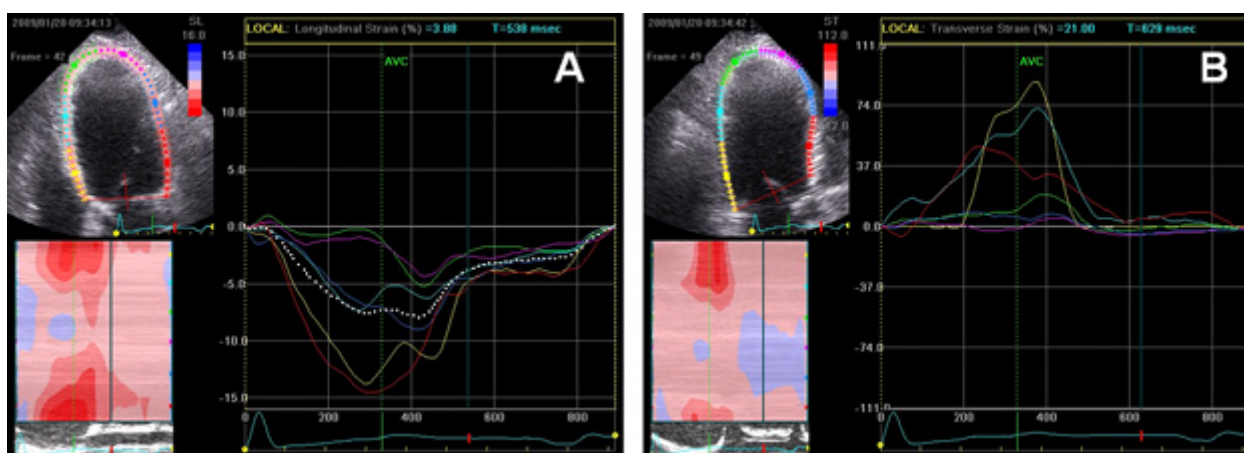
Cechą obrazu echokardiograficznego jest obecność nierównomiernych punktowych ziarnistości, które można obserwować pod kątem zmiany ich położenia w trakcie cyklu pracy serca, co wykorzystuje się w algorytmie śledzenia markerów akustycznych (pikseli) w skali szarości. Dzięki rozpoznawaniu na poszczególnych klatkach zapisu zmiany położenia określonych wyjściowo obszarów mięśnia sercowego oprogramowanie definiuje wektor ich przesunięcia, którego składowymi są dane przestrzenne (odległość) i czasowe (prędkość). Na podstawie tych danych można uzyskać wskaźniki deformacji mięśnia sercowego, określające skurczową i rozkurczową funkcję poszczególnych segmentów mięśnia sercowego. Technika STE, wykorzystująca echokardiografię 2-wymiarową (2D) wysokiej rozdzielczości, umożliwia analizę wszystkich segmentów mięśnia sercowego, niezależnie od

Adres do korespondencji:

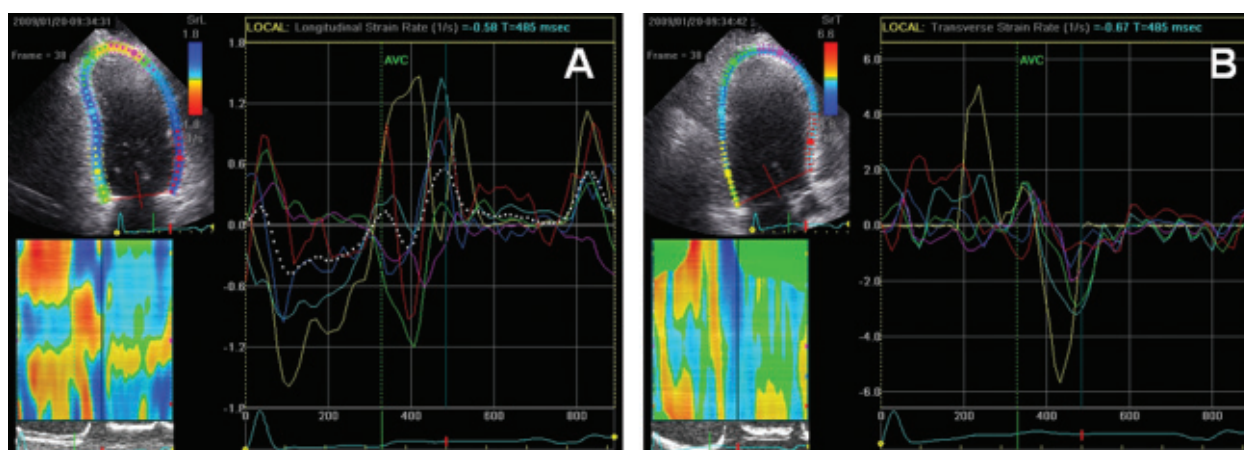
dr n. med. Ewa Szymczyk, Katedra i Klinika Kardiologii, Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Szpital im. Władysława Biegańskiego, ul. Kniaziewiczza 1/5, 91–347 Łódź, tel/faks: +48 42 251 60 15, e-mail: eszymczyk@ptkardio.pl

Praca wpłynęła: 28.01.2012 r. Zaakceptowana do druku: 26.03.2012 r.

Copyright © Polskie Towarzystwo Kardiologiczne



Rycina 1. Krzywe odkształcenia podłużnego, projekcja koniuskowa 4-jamowa (A) i poprzecznego, projekcja koniuskowa 3-jamowa (B); obliczane za pomocą techniki śledzenia markerów akustycznych 2D dla 6 segmentów lewej komory u pacjenta z zawałem ściany przednio-bocznej; w koronarografii amputowana gałąź okalająca



Rycina 2. Przykładowe krzywe tempa odkształcenia (*strain rate*) podłużnego, projekcja koniuskowa 2-jamowa (A) i poprzecznego, projekcja koniuskowa 3-jamowa (B); obliczane za pomocą techniki śledzenia markerów akustycznych 2D u pacjenta z zawałem ściany przednio-bocznej; w koronarografii amputowana gałąź okalająca

kąta padania wiązki ultradźwiękowej, w 3 kierunkach: podłużnym, poprzecznym (radialnym) i okrężnym [4]. Przewaga nowej metody STE nad dopplerowską echokardiografią tkankową (TDE) wynika nie tylko z uniezależnienia analizy od kąta padania wiązki ultradźwiękowej, ale również z wykorzystania rutynowych echokardiograficznych obrazów 2D. Do słabych stron STE należą niższa rozdzielczość czasowa (40–90 klatek/s) w porównaniu z TDE (> 100 klatek/s) oraz wrażliwość metody na suboptymalną jakość obrazu [5]. Artefakty i złe okno akustyczne, niepozwalające na optymalne uwidocznienie granic wsierdza, uniemożliwiają oprogramowaniu automatyczną detekcję przemieszczania pojedynczych pikseli obrazu i analizę poszczególnych segmentów mięśnia

sercowego, a także obliczanie parametrów odkształcenia i tempa odkształcenia. Odsetek segmentów wykluczanych z analizy STE wynosi 6–21% [6].

PORÓWNANIE WARTOŚCI ODKSZTAŁCENIA UZYSKIWANYCH ZA POMOCĄ STE I TDE, SONOMIKROMETRII I MRI SERCA Z OPCJĄ ZNAKOWANIA

Porównując wartości odkształcenia podłużnego i poprzecznego, Cho i wsp. [7] udowodnili, że wartości odkształcenia pochodzące z STE odznaczają się istotnie większym polem pod krzywą ROC dla odróżniania segmentów normokinetycznych i charakteryzujących się upośledzoną kurczliwością

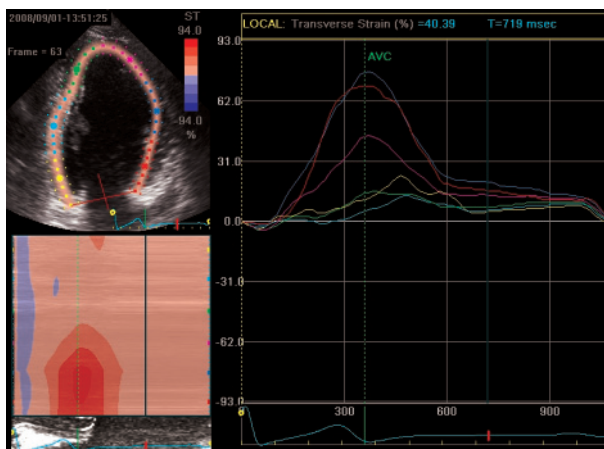
w porównaniu z wartościami uzyskanymi za pomocą TDE. Ponadto wartości odkształcenia uzyskane przy użyciu STE znajdują swoje potwierdzenie w badaniach sonomikrometrii i rezonansu magnetycznego serca z opcją znakowania (MRI tagging) [8]. Zwraca się jednak uwagę na pewne niedoszacowanie wartości odkształcenia podłużnego przez STE w porównaniu z wartościami uzyskiwanymi metodą MRI tagging, co może się wiązać z analizą nieco odmiennych płaszczyzn w obu technikach [9]. W porównaniu z TDE, STE dzięki nowoczesnemu oprogramowaniu pozwala na częściową automatyzację pomiarów odkształcenia, większą obiektywizację i powtarzalność uzyskiwanych wyników [10]. Należy pamiętać, że dostępne oprogramowanie dla STE podaje wartości odkształcenia lub tempa odkształcenia dla całego segmentu mięśnia lewej komory (LV), podczas gdy TDE pozwala na określenie tych parametrów w określonym obszarze zainteresowania. Ograniczenie to nie ma istotnego znaczenia klinicznego w większości patologii, ale może odgrywać rolę w przypadku oceny wczesnych etapów kardiomiopatii przerostowej czy arytmogenicznej dysplazji prawej komory, gdzie upośledzenie funkcji może być obserwowane początkowo w niewielkich obszarach mięśnia sercowego.

ZASTOSOWANIE KLINICZNE STE

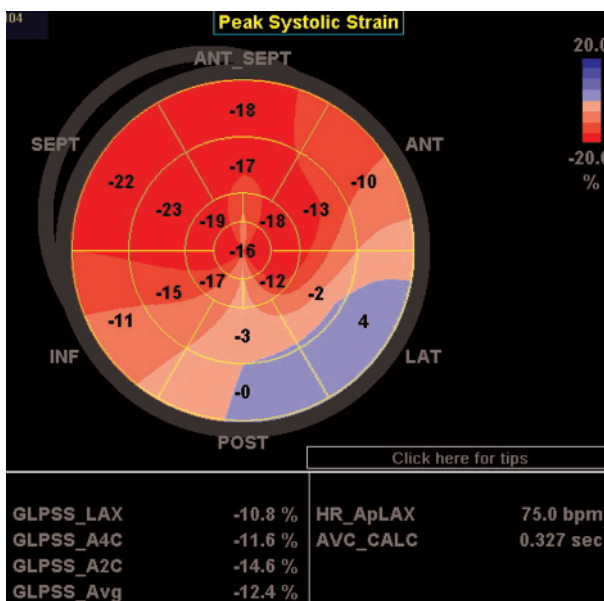
W ostatnich latach obserwuje się duże zainteresowanie STE spowodowane nie tylko klinicznie istotnym zastosowaniem tej metody w ilościowej analizie kurczliwości mięśnia sercowego, ale również względną prostotą oceny parametrów odkształcenia. Znajduje to odzwierciedlenie w rosnącej liczbie publikacji dotyczących zastosowań STE w diagnostyce chorób sercowo-naczyniowych. Na rycinach 3 i 4 przedstawiono praktyczne zastosowanie nowej techniki dla oceny funkcji skurczowej u pacjentów z zawałem serca. Wartości referencyjne dla poszczególnych kierunków odkształcenia zostały określone na podstawie wyników opublikowanych prac. W tabeli 1 przedstawiono średnie wartości odkształcenia podłużnego [6], natomiast w tabeli 2 zawarto średnie wartości odkształcenia okrężnego i poprzecznego [11]. Jednak nadal w ograniczonym zakresie dysponujemy ważnymi, z klinicznego punktu widzenia, wartościami odcięcia dla poszczególnych kierunków odkształcenia, które jednoznacznie definiowałyby wartości patologiczne.

ZASTOSOWANIE STE W OCENIE ŻYWOTNOŚCI I NIEDOKRWIENIA MIOKARDIUM

Pierwsze wyniki badań wskazują, że ocena regionalnej funkcji mięśnia sercowego technikami ilościowymi poprawia wartość diagnostyczną echokardiografii obciążeniowej dla wykrywania żywego miokardium u chorych z przewlekłą pozawałową dysfunkcją skurczową LV kwalifikowanych do rewaskularyzacji. Ponadto STE, dzięki możliwości bardzo dokładnej ilościowej oceny funkcji mięśnia sercowego, może znaleźć zastosowanie w ocenie żywotności na podstawie obrazów spoczyn-



Rycina 3. Krzywe odkształcenia poprzecznego obliczone za pomocą techniki śledzenia markerów akustycznych 2D dla 6 segmentów lewej komory (projekcja koniuszkowa 2-jamowa) u pacjenta z zawałem ściany dolnej; w koronarografii amputowana prawa tętnica wieńcowa



Rycina 4. Analiza odkształcenia podłużnego za pomocą automatycznej detekcji miokardium; rycina przedstawia wartości maksymalnego skurczowego odkształcenia podłużnego w 17 segmentach lewej komory i obliczone automatycznie przez oprogramowanie wartości globalnego skurczowego odkształcenia podłużnego lewej komory u pacjenta po przebytym zawałe serca ściany dolno-bocznej

kowych, które do tej pory miały ograniczoną rolę ze względu na małą dokładność stosowanej na co dzień oceny wizualnej. Dotychczasowe wyniki badań doświadczalnych i klinicznych wydają się obiecujące [12]. Potencjalna możliwość oceny żywotności miokardium, dzięki wykorzystaniu spoczynkowych

Tabela 1. Średnie wartości maksymalnego skurczowego odkształcenia podłużnego w grupie 242 zdrowych ochotników w wieku 51 ± 12 lat (Marwick i wsp. [6])

Segment lewej komory (projekcja koniuszkowa 4-jamowa)	Średnie wartości maks. skurczowego odkształcenia podłużnego (%)	Segment lewej komory (projekcja koniuszkowa 2-jamowa)	Średnie wartości maks. skurczowego odkształcenia podłużnego (%)	Segment lewej komory (projekcja koniuszkowa 3-jamowa)	Średnie wartości maks. skurczowego odkształcenia podłużnego (%)
Podstawno-przegrodowy	$-13,7 \pm 4,0$	Podstawno-przedni	$-20,1 \pm 4,0$	Podstawny przednio-przegrodowy	$-18,3 \pm 3,5$
Środkowo-przegrodowy	$-18,7 \pm 3,0$	Środkowo-przedni	$-18,8 \pm 3,4$	Środkowy przednio-przegrodowy	$-19,4 \pm 3,2$
Koniuszkowo-przegrodowy	$-22,3 \pm 4,8$	Koniuszkowo-przedni	$-19,4 \pm 5,4$	Koniuszkowy przednio-przegrodowy	$-18,8 \pm 5,9$
Koniuszkowo-boczny	$-19,2 \pm 5,4$	Koniuszkowo-dolny	$-22,5 \pm 4,5$	Koniuszkowo-tylny	$-17,7 \pm 6,0$
Środkowo-boczny	$-18,1 \pm 3,5$	Środkowo-dolny	$-20,4 \pm 3,5$	Środkowo-tylny	$-16,8 \pm 5,0$
Podstawno-boczny	$-17,8 \pm 5,0$	Podstawno-dolny	$-17,1 \pm 3,9$	Podstawno-tylny	$-14,6 \pm 7,4$

Tabela 2. Średnie wartości maksymalnego skurczowego odkształcenia okrężnego i poprzecznego w grupie 60 zdrowych ochotników w wieku 39 ± 15 lat (Hurlburt i wsp. [11])

Segment lewej komory (oś krótka, na poziomie segmentów podstawnych)	Średnie wartości maks. skurczowego odkształcenia okrężnego	Średnie wartości maks. skurczowego odkształcenia poprzecznego
Przedni	-24 ± 6	39 ± 16
Boczny	-22 ± 7	37 ± 18
Tylny	-21 ± 7	37 ± 17
Dolny	-22 ± 6	37 ± 17
Przegrodowy	-24 ± 6	37 ± 19
Przednio-przegrodowy	-26 ± 11	39 ± 15

badania echokardiograficznych, bez użycia środków farmakologicznych lub kontrastowych, byłaby istotnym postępem w technikach obrazowania, dlatego bardzo pożądana wydaje się weryfikacja wartości diagnostycznej STE w ocenie żywotności mięśnia sercowego. Ponadto STE może być przydatne w obiektywizacji echokardiograficznej próby obciążeniowej. Ng i wsp. [13] dowiedli, że odkształcenie podłużne charakteryzowało się podobną dokładnością diagnostyczną jak wizualna ocena zaburzeń kurczliwości, dokonywana przez doświadczonego echokardiografistę. Połączenie analizy odkształcenia i eksperckiej wizualnej oceny kurczliwości dodatkowo zwiększało dokładność diagnostyczną w porównaniu z izolowaną analizą odkształcenia podłużnego.

ZASTOSOWANIE STE W PRZEWIDYWANIU POWROTU FUNKCJI MIOKARDIUM PO ZAWALE SERCA

We wczesnej fazie zawału serca upośledzenie funkcji skurczowej, stwierdzane w badaniu echokardiograficznym, może dotyczyć segmentów wykazujących żywotność mięśnia ser-

cowego i objętych martwicą. W wyjściowo akinetycznych, ale żywotnych, segmentach miokardium po skutecznej rewaskularyzacji odnotowuje się zwykle poprawę kurczliwości, podczas gdy nie stwierdza się powrotu funkcji w segmentach objętych martwicą. Przewidywanie powrotu funkcji skurczowej u pacjentów po zawale serca jest ważnym markerem prognostycznym, pozwalającym na identyfikację pacjentów wysokiego ryzyka, zagrożonych wystąpieniem powikłań sercowo-naczyniowych. Caracciolo i wsp. [14] w pracy dotyczącej osób z pierwszym w życiu zawałem serca z uniesieniem odcinka ST (STEMI), leczonych pierwotną angioplastyką wieńcową, dowiedli, że parametry odkształcenia podłużnego i okrężnego, w przeciwieństwie do parametrów odkształcenia poprzecznego, pozwalały na przewidywanie poprawy funkcji. Warta uwagi jest również praca Eeka i wsp. [15], dotycząca pacjentów z zawałem serca bez uniesienia odcinka ST (NSTEMI), w której oceniano regionalną funkcję skurczową za pomocą STE tuż przed rewaskularyzacją i po 9 miesiącach obserwacji. W cytowanym badaniu poskurczowe skracanie podłużne okazało się silnym predyktorem powrotu funkcji skurczowej mio-

kardium w obserwacji odległej. Podobnie inne prace, np. Mollema i wsp. [16], dowiodły przydatności globalnego skurczowego odkształcenia podłużnego jako niezależnego predyktora poprawy funkcji LV.

WARTOŚĆ PREDYKCYJNA PARAMETRÓW ODKSZTAŁCENIA OCENIANYCH ZA POMOCĄ STE W PRZEWIDYWANIU ZJAWISKA REMODELINGU PO ZAWALE SERCA

Zawał serca może powodować zmianę wymiarów, masy i geometrii LV, co upośledza jej funkcję, a także pogarsza rokowanie pacjentów [17]. Zjawisko to określa się mianem niekorzystnej przebudowy (remodeling) i może być zjawiskiem ostrym lub przewlekłym, może obejmować obszar mięśnia objęty i nieobjęty zawałem [18]. Remodeling jest uważany za prekursora incydentów sercowo-naczyniowych i silny czynnik predykcyjny śmiertelności. Dowiedziono, że wartości odkształcenia podłużnego, oceniane tuż po pierwotnym udroźnieniu dożylowej tętnicy wieńcowej są dobrym czynnikiem predykcyjnym remodelingu LV u pacjentów z zawałem ściany przedniej [19]. Ponadto w badaniu echokardiograficznym wykonanym w pierwszej dobie po pierwotnej angioplastyce segmenty akinetyczne, wykazujące poprawę funkcji skurczowej w obserwacji 2-miesięcznej, charakteryzują się istotnie statycznie wyższym tempem odkształcenia we wczesnej fazie rozkurczu ($p = 0,04$).

OCENA ROTACJI JAKO PARAMETRU CZYNNOŚCI SKURCZOWEJ LEWEJ KOMORY ZA POMOCĄ STE

Skomplikowany układ przestrzenny włókien mięśnia sercowego, składający się z 3 warstw o różnej orientacji, jest odzwierciedleniem złożonych zjawisk czynnościowych serca. Skurcz mięśnia sercowego jest efektem trójwymiarowego ruchu skrętnego komory [20]. Patrząc od strony koniuszka, rotacja (wyrażana w stopniach) podstawy serca zachodzi w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, a części koniuszkowej — w kierunku przeciwnym. Skręcenie LV (*torsion, twist*) odpowiada bezwzględnej różnicy wartości obrotu na obydwu poziomach i jest wyrażane w stopniach [21]. Jak dotąd jedyną metodą pozwalającą w warunkach klinicznych na ocenę złożonej biomechaniki serca, uwzględniającą deformację skrętną, było obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego [22]. Opublikowane przez Helle-Valle'a et al. [23] dane wskazują na przydatność zastosowania STE do nieinwazyjnej oceny rotacji LV na podstawie ruchomych obrazów 2D w osi krótkiej na poziomie podstawy serca i koniuszka (ryc. 5). Z piśmiennictwa wiadomo, że deformacja skrętna LV zależy od wieku, obciążenia wstępnego, następczego i całkowitej czynności skurczowej, w przypadku zwiększenia objętości rozkurczowej skręcenie ulega zwiększeniu, natomiast u chorych z dysfunkcją serca dochodzi do zmian przeciwnych [24].



Rycina 5. Ocena rotacji lewej komory za pomocą techniki śledzenia markerów akustycznych 3D

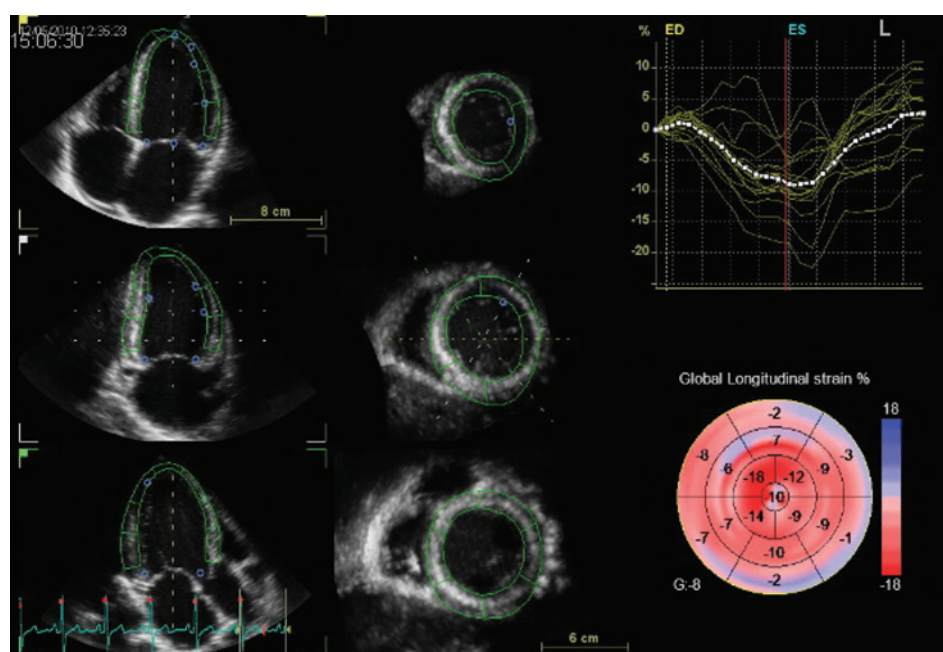
PERSPEKTYWY ROZWOJU I DALSZEGO ZASTOSOWANIA STE

Technika STE jest szybko rozwijającą się metodą, wykorzystywaną obecnie w wielu badaniach klinicznych. Kwestią najbliższego czasu będzie ustalenie punktów odcięcia wartości odkształcenia i tempa odkształcenia dla podejmowania decyzji klinicznych, korelujących z występowaniem twardych punktów końcowych. Konieczna będzie również dalsza standaryzacja wyników, uzyskiwanych za pomocą różnych aparatów echokardiograficznych oraz różnych technik, co może pozwolić na powszechne wdrożenie STE do codziennej praktyki klinicznej. Wyniki dotychczasowych analiz wskazują na dobrą zgodność porównywanych systemów echokardiograficznych (Vivid 7 GE Ultrasound i Artida 4D Toshiba Medical Systems) dla analizy globalnego odkształcenia podłużnego i na gorszą powtarzalność wyników dla parametrów odkształcenia poprzecznego i okrężnego [25]. Kolejnym krokiem w dziedzinie echokardiografii jest nowa technika STE oparta na obrazowaniu trójwymiarowym (3D STE), która może pokonać dotychczasowe ograniczenia TDE i 2D STE (ryc. 5, 6). Perez i wsp. [26] wykazali, że 3D STE pozwala na uzyskanie wartości odkształcenia porównywalnych z 2D STE, ale w znacznie krótszym czasie, co czyni nową technikę jeszcze bardziej przydatną w codziennej praktyce klinicznej. Nesser i wsp. [27] dowiedli, że wartości odkształcenia uzyskane za pomocą 3D STE charakteryzują się lepszą powtarzalnością wyników i silniejszymi korelacjami z wartościami pochodzącymi z MRI serca w porów-

naniu z 2D STE. Technika 3D STE pozwala na ocenę nowych parametrów, które w bardziej kompleksowy sposób będą odzwierciedlać regionalną i globalną funkcję skurczową LV, np. powierzchnia odkształcenia, wyrażająca zmianę pola powierzchni wsierdza LV w czasie jej skurczu, która jest czułym i powtarzalnym markerem pozwalającym na wczesne wykrycie niewielkich zaburzeń funkcji skurczowej [28]. Inne zastosowanie 3D STE stanowi ocena dyssynchronii, będącej ilościowym parametrem związanym z odpowiedzią na terapię resynchronizującą stosowaną w skurczowej niewydolności serca [29].

WNIOSKI

Technika STE to obiecująca metoda echokardiograficzna, która nie jest jeszcze uwzględniana w standardach badań klinicznych, ale która w krótkim czasie z narzędzia wykorzystywanego wyłącznie do badań naukowych stała się techniką możliwą do coraz powszechniejszego zastosowania w codziennej praktyce echokardiograficznej. Dzięki opartym na STE parametrom odkształcenia, ocenianym w stosunkowo prosty sposób na podstawie analizy standardowych obrazów echokardiograficznych 2D i 3D, uzyskano możliwość badania mechanizmów patofizjologicznych związanych z niedokrwieniem, oceną żywotności i przewidywania powrotu funkcji skurczowej. Ponadto analiza czasowa parametrów odkształcenia w poszczególnych punktach miokardium w trakcie cyklu pracy serca pozwalana na ilościową ocenę zaburzeń kurczliwości u pacjentów z niewydolnością serca poddawanych te-



Rycina 6. Analiza odkształcenia podłużnego za pomocą techniki śledzenia markerów akustycznych 3D przedstawiona za pomocą krzywych (wartość średnia przedstawiona jako gruba linia przerywana) oraz w postaci mapy planarnej w 17 segmentach lewej komory u pacjenta z chorobą niedokrwinną serca

rapii resynchronizującej. Kluczową kwestią najbliższego czasu będzie ustalenie punktów odcięcia wartości odkształcenia i tempa odkształcenia dla podejmowania decyzji klinicznych, korelujących z występowaniem twardych punktów końcowych. Konieczna będzie również dalsza standaryzacja wyników, używanych za pomocą różnych aparatów echokardiograficznych oraz różnych technik obrazowania.

Praca finansowana przez Uniwersytet Medyczny w Łodzi z zadania badawczego nr 502-03/1-049-02/502-14-055.

Konflikt interesów: nie zgłoszono

Piśmiennictwo

- Lipiec P, Szymczyk E, Michalski B et al. Late enhancement in computed tomography as a new technique for evaluation of myocardial viability: preliminary experience. *Pol Przegl Kardiol*, 2011; 13: 89–92.
- Sutherland GR, Stewart MJ, Groundstroem KW et al. Color Doppler myocardial imaging: a new technique for the assessment of myocardial function. *J Am Soc Echocardiogr*, 1994; 7: 441–458.
- Szymczyk E, Chrzanowski Ł, Krzemińska-Pakuła M et al. Echokardiograficzna ocena rotacji lewej komory przy zastosowaniu techniki śledzenia markerów akustycznych (speckle tracking). *Pol Przegl Kardiol*, 2009; 11: 31–35.
- Chrzanowski Ł, Lipiec P, Krzemińska-Pakuła M et al. Echokardiograficzna ocena odkształcenia lewej komory przy zastosowaniu techniki doplera tkankowego oraz śledzenia markerów akustycznych (speckle tracking). *Pol Przegl Kardiol*, 2007; 9: 195–202.
- Abraham TP, Pinheiro AC. Speckle-derived strain a better tool for quantification of stress echocardiography? *J Am Coll Cardiol*, 2008; 51: 158–160.
- Marwick TH, Leano RL, Brown J et al. Myocardial strain measurement with 2-dimensional speckle-tracking echocardiography: definition of normal range. *J Am Coll Cardiol Cardiovasc Imaging*, 2009; 2: 80–84.
- Cho GY, Chan J, Leano R et al. Comparison of two-dimensional speckle and tissue velocity based strain and validation with harmonic phase magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol*, 2006; 97: 1661–1666.
- Amundsen BH, Helle-Valle T, Edvardsen T et al. Noninvasive myocardial strain measurement by speckle tracking echocardiography: validation against sonomicrometry and tagged magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol*, 2006; 47: 789–793.
- Bansal M, Cho GY, Chan J et al. Feasibility and accuracy of different techniques of two-dimensional speckle based strain and validation with harmonic phase magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr*, 2008; 21: 1318–1325.
- Becker M, Bilke E, Kühl H et al. Analysis of myocardial deformation based on pixel tracking in 2D echocardiographic images allows quantitative assessment of regional left ventricular function. *Heart*, 2006; 92: 1102–1108.
- Hurlburt HM, Aurigemma GP, Hill JC et al. Direct ultrasound measurement of longitudinal, circumferential, and radial strain using 2-dimensional strain imaging in normal adults. *Echocardiography*, 2007; 24: 723–731.
- Lipiec P, Szymczyk E, Michalski B et al. Echocardiographic assessment of myocardial viability at rest by speckle tracking technique – comparison with stress echocardiography. *Pol Przegl Kardiol*, 2010; 12: 281–286.
- Ng AC, Sitges M, Pham PN et al. Incremental value of 2D speckle tracking strain imaging to wall motion analysis for detection of coronary artery disease in patients undergoing dobutamine stress echocardiography. *Am Heart J*, 2009; 158: 836–844.
- Caracciolo G, Eleid MF, Abe H et al. Non-uniform recovery of left ventricular transmural mechanics in ST-segment elevation myocardial infarction. *Cardiovasc Ultrasound*, 2010; 8: 31.
- Eek C, Grenne B, Brunvand H et al. Postsystolic shortening is a strong predictor of recovery of systolic function in patients with non-ST-elevation myocardial infarction. *Eur J Echocardiogr*, 2011; 12: 483–489.
- Mollema SA, Delgado V, Bertini M et al. Viability assessment with global left ventricular longitudinal strain predicts recovery of left ventricular function after acute myocardial infarction. *Circ Cardiovasc Img*, 2010; 3: 15–23.
- The PREAMI Investigators. PREAMI: Perindopril and Remodelling in Elderly with Acute Myocardial Infarction: study rationale and design. *Cardiovasc Drugs Ther*, 2000; 14: 671–679.
- Nicolosi GL, Latini R, Marino P et al. The prognostic value of predischARGE quantitative 2D echocardiographic measurements and the effects of early lisinopril treatment on left ventricular structure and function after acute myocardial infarction in the GISSI-3 trial. *Eur Heart J*, 1996; 17: 1646–1656.
- Park YH, Kang SJ, Song JK et al. Prognostic value of longitudinal strain after primary reperfusion therapy in patients with anterior-wall acute myocardial infarction. *J Am Soc Echocardiogr*, 2008; 21: 262–267.
- Sengupta PP, Krishnamoorthy VK, Korinek J et al. Left ventricular form and function revisited: applied translational science to cardiovascular ultrasound imaging. *J Am Soc Echocardiogr*, 2007; 20: 539–551.
- Uznańska B, Chrzanowski Ł, Plewka M. The relationship between left ventricular late-systolic rotation and twist, and classic parameters of ventricular function and geometry. *Kardiol Pol*, 2008; 66: 740–747.
- Epstein FH. MRI of left ventricular function. *J Nucl Cardiol*, 2007; 14: 729–744.
- Helle-Valle T, Crosby J, Edvardsen T et al. New noninvasive method for assessment of left ventricular rotation. Speckle tracking echocardiography. *Circulation*, 2005; 112: 3149–3156.
- Takeuchi M, Nakai H, Kokumai M et al. Age-related changes in left ventricular twist assessed by two-dimensional speckle-tracking imaging. *J Am Soc Echocardiogr*, 2006; 19: 1077–1084.
- Manovel A, Dawson D, Smith B, Nihoyannopoulos P. Assessment of left ventricular function by different speckle-tracking software. *Eur J Echocardiogr*, 2010; 11: 417–421.
- Pérez de Isla L, Balcones DV, Fernández-Golfín C et al. Three-dimensional-wall motion tracking: a new and faster tool for myocardial strain assessment: comparison with two-dimensional-wall motion tracking. *J Am Soc Echocardiogr*, 2009; 22: 325–330.
- Nesser HJ, Mor-Avi V, Gorissen W et al. Quantification of left ventricular volumes using three-dimensional echocardiographic speckle tracking: comparison with MRI. *Eur Heart J*, 2009; 30: 1565–1573.
- Wen H, Liang Z, Zhao Y, Yang K. Feasibility of detecting early left ventricular systolic dysfunction using global area strain: a novel index derived from three-dimensional speckle-tracking echocardiography. *Eur J Echocardiogr*, 2011; 12: 910–916.
- Kawagishi T. Speckle tracking for assessment of cardiac motion and dyssynchrony. *Echocardiography*. 2008; 25: 1167–1171.