



CO WARUNKUJE SIŁĘ, MOC I WYTRZYMAŁOŚĆ MIĘŚNI SZKIELETOWYCH CZŁOWIEKA?

Jerzy A. Żołądź

Akademia Wychowania Fizycznego w Krakowie, Zakład Fizjologii Mięśni

Siła mięśni szkieletowych, ich moc i wytrzymałość odgrywają ważną rolę w codziennej lokomocji człowieka. Wielkości tych parametrów są przedmiotem troski sportowców i trenerów. Młody, zdrowy człowiek w codziennym życiu nie doświadcza ograniczeń lokomocyjnych z powodu małych wielkości siły, mocy czy wytrzymałości mięśni szkieletowych. Ograniczenia te pojawiają się jednak w następstwie różnych chorób, np. w niewydolności krążeniowo-oddechowej, chorobach metabolicznych i innych, jak również w procesie starzenia się organizmu człowieka. Zdolność wytwarzania siły, generowania mocy, jak i wytrzymałość mięśni warunkuje szereg czynników. Celem niniejszego wykładu jest przedstawienie najważniejszych z nich.

Uwarunkowania morfologiczne

Maksymalna wielkość siły mięśniowej zależy głównie od przekroju poprzecznego mięśnia. W świetle licznych badań mięśnie szkieletowe człowieka w maksymalnym skurczu izometrycznym wywołują siłę wynoszącą od 30-80 N · cm⁻² przekroju poprzecznego mięśnia. Wzrost masy mięśniowej prowadzi do wzrostu siły izometrycznej. Przyczynia się również do wzrostu maksymalnej mocy mięśni szkieletowych.

Maksymalna wielkość mocy generowanej przez mięśnie zależy jednakże w większym stopniu od maksymalnej szybkości skracania mięśnia, aniżeli od wielkości maksymalnej siły mięśniowej. Głównym czynnikiem warunkującym maksymalną szybkość skracania mięśnia jest skład włókien mięśniowych. W mięśniach szkieletowych człowieka wyróżniamy trzy główne typy włókien: włókna typu I, IIA i IIX. Maksymalna szybkość skracania włókien typu IIX jest około 10 razy wyższa aniżeli włókien typu I (Sargeant i Jones, 1995). Duża zawartość włókien typu IIX oraz IIA ułatwia osiągnięcie wysokich wielkości mocy, nawet u osób o stosunkowo małej masie mięśniowej.

W wyniku systematycznego treningu włókna mięśniowe ulegają przekształceniu. Już po kilku miesiącach treningu, bez względu na charakter treningu (trening wytrzymałościowy lub szybkościowy), stwierdza się redukcję zawartości włókien typu IIX (Andersen i Aagaard, 2000). Odwrotny efekt przynosi zmniejszenie aktywności fizycznej



(np. unieruchomienie kończyny po złamaniu kości). W następstwie redukcji obciążeń treningowych lub unieruchomienia obserwuje się wzrost proporcji włókien typu IIX (Majerczak i wsp., 2001). W wyniku takiej transformacji należałoby się spodziewać gwałtownego wzrostu maksymalnej mocy mięśniowej, jednakże unieruchomieniu najczęściej towarzyszy spadek przekroju poprzecznego mięśnia, a zatem spadek siły mięśniowej, który negatywnie wpływa na możliwość generowania mocy maksymalnej.

Uwarunkowania energetyczne

Obok uwarunkowań morfologicznych bardzo ważną rolę w wyzwaniu siły i generowaniu mocy mięśniowej odgrywa efektywność produkcji energii w komórkach mięśniowych. Mięśnie, tak jak inne tkanki, korzystają z energii zmagazynowanej w adenozyntrofosforanie (ATP). Zasoby ATP w mięśniach szkieletowych człowieka wynoszą około 24 mmole na kilogram suchej masy mięśniowej [$\text{mmol} \cdot \text{kg d.m.}^{-1}$]. Podczas bardzo intensywnej pracy, np. sprint z maksymalną mocą, mięśnie zużywają ponad 14 mmol $\text{ATP} \cdot \text{kg d.m.}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. W takim wysiłku bez resyntezy ATP w ciągu 2 sekund doszłoby do kryzysu energetycznego komórek mięśniowych. Zdolność komórek mięśniowych do resyntezy ATP odgrywa zatem bardzo ważną rolę w generowaniu mocy (Żołądź, 2001). Resynteza ATP w komórkach mięśniowych przebiegać może w procesach energetycznych niewymagających tlenu (procesy beztlenowe – reakcja kinazy kreatynowej, glikoliza, reakcja miokinazowa) lub/i w procesach wymagających tlenu (procesy tlenowe – fosforylacja oksydacyjna). Efektywność wytwarzania ATP w tych procesach znacznie się różni, zarówno pod względem maksymalnej mocy produkcji ATP [$\text{mmol ATP} \cdot \text{kg d.m.}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] w mięśniu, jak i pojemności energetycznej, tj. ilości ATP możliwej do wyprodukowania bez ograniczeń czasowych (mmol ATP). Tlenowe procesy energetyczne w porównaniu z beztlenowymi cechuje duża pojemność, lecz niska moc produkcji ATP. Przykładowo, maksymalna moc produkcji ATP w mięśniu czworogłowym uda, przy wykorzystaniu wolnych kwasów tłuszczowych (FFA) jako substratu dla fosforylacji oksydacyjnej wynosi około $1,4 \text{ mmol ATP} \cdot \text{kg d.m.}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, podczas gdy maksymalne tempo resyntezy ATP w reakcji kinazy kreatynowej może osiągać 9-10 $\text{mmol ATP} \cdot \text{kg d.m.}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Jednakże już po kilku sekundach intensywnej pracy maksymalne tempo resyntezy ATP w reakcji kinazy kreatynowej znacznie spada, natomiast pełna moc fosforylacji oksydacyjnej przy wykorzystaniu wolnych kwasów tłuszczowych może być utrzymana przez kilka godzin. Regularny trening fizyczny prowadzi do wzrostu zarówno mocy jak i pojemności wszystkich reakcji energetycznych w komórkach mięśniowych.

Ważnym czynnikiem warunkującym zdolność organizmu człowieka do wysiłków długotrwałych jest sprawność mechanizmów transportu i utylizacji tlenu w komórkach mięśniowych (Astrand i Rodahl, 1986; Kozłowski i Nazar, 1995; Wilmore i Costill, 1999). Miarą sprawności tych układów jest wielkość maksymalnej konsumpcji tlenu (VO_2max). Największe wartości VO_2max , przekraczające nawet $85 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, osiągają wytrenowani sportowcy, uprawiający konkurencje wytrzymałościowe, np. biegi długodystansowe, biegi narciarskie, kolarstwo itp. U młodych, zdrowych ludzi VO_2max wynosi około $40\text{-}50 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Już po przekroczeniu około 30 roku życia VO_2max maleje zwykle



w tempie około 10 procent na dekadę. Gdy wielkość $VO_2\max$ spadnie poniżej $15 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, człowiek zaczyna tracić pełną niezależność lokomocyjną. Regularny trening fizyczny zwalnia tempo spadku $VO_2\max$ w starzejącym się organizmie człowieka (Żołądź, 2001).

Obok wielkości $VO_2\max$ ważnym wskaźnikiem zdolności do wysiłków długotrwałych jest wielkość mocy generowanej w chwili wystąpienia progu mleczanowego (LT), manifestującego się wyraźną akumulacją mleczanów we krwi. Najwyższe wielkości mocy progowej stwierdza się u wytrenowanych sportowców uprawiających konkurencje wytrzymałościowe. Najniższe zaś występują u osób nie wytrenowanych, które prowadzą tzw. „siedzący tryb życia”.

Innym ważnym wskaźnikiem sprawności mechanizmów transportu i utylizacji O_2 jest kinetyka VO_2 w początkowej fazie wysiłku. Parametrem charakteryzującym główną fazę kinetyki VO_2 jest wielkość τ_1 . Wielkość ta okazuje się być cennym wskaźnikiem w badaniu wydolności fizycznej człowieka.

Temperatura mięśni

Ważnym czynnikiem wpływającym na zdolność mięśni do generowania mocy maksymalnej jest temperatura wewnątrzmięśniowa. Jej wielkość w spoczynku mierzona na głębokości około 4 cm, w mięśniu czworogłowym uda, wynosi około 36°C . W wyniku prawidłowej rozgrzewki wzrasta ona o około $3\text{-}4^\circ\text{C}$, co prowadzi do wzrostu możliwości generowania mocy maksymalnej o około 15-20%. W wyniku wzrostu temperatury rośnie maksymalna szybkość skracania włókien mięśniowych. Włókna typu I nabierają cech włókien typu II. Przeciwny efekt wywołuje oziębianie mięśnia, które prowadzi do spadku maksymalnej szybkości skracania mięśnia oraz redukcji mocy maksymalnej. Zjawisko to jest przyczyną słabych występów sprinterów podczas biegów rozgrywanych w niskich temperaturach otoczenia. Ponadto spadek temperatury wewnątrzmięśniowej – prowadzący do spadku mocy mięśniowej jest przyczyną wielu urazów osób w starszym wieku. W wysiłkach długotrwałych wzrost temperatury wewnątrzmięśniowej poprawia sprawność mechaniczną mięśni (Sargeant i Jones, 1995; Żołądź, 2001).

Zmęczenie

Ważnym czynnikiem warunkującym możliwości rozwijania siły i generowania mocy jest zmęczenie. Już od pierwszych sekund maksymalnego wysiłku fizycznego doświadczamy zjawiska zmęczenia. Zmęczenie, wg Edwardsa, definiujemy jako utratę zdolności generowania wymaganej lub spodziewanej wielkości mocy. Przyczyny zmęczenia są złożone. Rozróżniamy dwa typy zmęczenia: *zmęczenie ośrodkowe* – związane z pogorszeniem funkcjonowania ośrodkowego układu nerwowego oraz *zmęczenie obwodowe* – występujące w mięśniach szkieletowych (Żołądź, 2001).



Jedną z głównych przyczyn zmęczenia ośrodkowego podczas długotrwałych wysiłków fizycznych jest hipoglikemia (duży spadek poziomu glukozy we krwi). Inną częstą przyczyną zmęczenia jest hipertermia. Wśród przyczyn zmęczenia ośrodkowego często wskazuje się na toksyczne działanie amoniaku. Według niektórych autorów (Newsholme i Blomstrand, 1996) przyczyną zmęczenia ośrodkowego jest zaburzenie stężeń neurotransmiterów w mózgu.

Do głównych przyczyn zmęczenia obwodowego w wysiłkach krótkotrwałych o maksymalnej mocy zalicza się: zwolnienie tempa produkcji ATP w stosunku do jego zużycia, spadek ilości energii uzyskanej z hydrolizy ATP, zużycie zasobów fosfokreatyny oraz glikogenu (głównie w włóknach typu II), jak i akumulację w komórkach mięśniowych takich metabolitów, jak: P_i , H^+ , ADP, IMP i NH_3 . Główną przyczyną zmęczenia mięśni szkieletowych w wysiłkach długotrwałych jest zużycie zasobów glikogenu. Ponadto, w warunkach kryzysu energetycznego mięśni, czynniki takie jak: wzrost stężeń ADP, AMP, IMP i amoniaku mogą być odpowiedzialne za zmęczenie obwodowe w wysiłkach długotrwałych (Żołądź, 2001).

Ważnym czynnikiem nasilającym zmęczenie jest spadek ciśnienia atmosferycznego. Szczególnie dotkliwe jest oddziaływanie niskiego ciśnienia atmosferycznego na znacznych wysokościach nad poziomem morza, które wywołuje hipoksję.

Jak można poprawić siłę, moc i wytrzymałość mięśni?

Jedynym sposobem na poprawę siły, mocy i wytrzymałości mięśni szkieletowych człowieka jest regularny trening fizyczny. Już po kilku tygodniach regularnych ćwiczeń siłowych obserwuje się wyraźny przyrost siły mięśniowej. W ciągu 3-6 tygodni treningu wielkość siły mięśniowej przyrasta o 25-100% wartości wyjściowej. W pierwszych tygodniach treningu przyrost siły mięśniowej następuje wcześniej aniżeli przyrost masy mięśniowej. W wyniku regularnych ćwiczeń wytrzymałościowych (bieg, jazda na rowerze itp.) już w ciągu 2-4 tygodni dochodzi do przesunięcia progu mleczanowego w prawo (tj. w kierunku wyższych mocy) oraz wyraźnego skrócenia wielkości τ_1 , charakteryzującej główną fazę kinetyki VO_2 . Zmiany te występują wcześniej aniżeli przyrost VO_{2max} .

Pomimo szybkich zmian adaptacyjnych występujących w organizmie człowieka już w pierwszych tygodniach treningu, osiągnięcie mistrzostwa sportowego wymaga jednak wielu lat treningu. W treningu sportowca istnieje konieczność precyzyjnego doboru ćwiczeń fizycznych, których ilość oraz intensywność ustalana jest na podstawie specjalistycznych badań laboratoryjnych. W wyniku takiego treningu w sposób kontrolowany zwiększana jest siła, moc lub wytrzymałość mięśni szkieletowych sportowca. Zaznaczyć należy, że występują duże międzyosobnicze różnice w tempie przyrostu siły, mocy lub wytrzymałości mięśni szkieletowych sportowca w procesie treningu.

Trening o charakterze rekreacyjnym zalecany jest nawet do późnej starości. Okazuje się, że w wyniku kilkutygodniowego treningu osób w starszym wieku (nawet po przekroczeniu 90 roku życia) siła, moc i wytrzymałość mięśni wyraźnie wzrasta, prowadząc do poprawy



jakości życia. W wyniku treningu fizycznego obok wzrostu oporności na zmęczenie fizyczne poprawie ulega stan samopoczucia psychicznego.

Przekonującym dowodem na skuteczność treningu osób w starszym wieku są rekordy świata uzyskiwane przez sportowców rywalizujących w kategorii Masters (Żołądź, 2001). Przykładowo rekordzista świata w grupie osób, które przekroczyły 75 lat życia, uzyskał w biegu na 100 m rezultat 13,4 sekundy a w skoku w dal 4,78 m.

Literatura

1. Andersen, J.L., Aagaard, P. (2000) Myosin heavy chain IIX overshoot in human skeletal muscle. *Muscle Nerve* 23, 1095-1104.
2. Astrand, P.O., Rodahl, K. (1986) *Textbook of Work Physiology*. Physiological Bases of Exercise. McGraw-Hill Book Company. New York.
3. Kozłowski, S., Nazar, K. (1995) *Wprowadzenie do Fizjologii Klinicznej*. Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL.
4. Majerczak, J., Duda, K., Żoladz, J.A. (2001) The effect of innervation, hormonal and mechanical factors on expression of myosin isoforms in human skeletal muscle. *Folia Med Cracov.* 42, 89-104. Review. Polish.
5. Newsholme, E.A., Blomstrand, E. (1996) The plasma level of some amino acids and physical and mental fatigue. *Experientia* 52, 413-415. Review.
6. Sargeant A.J., Jones D.A. (1995) The significance of motor unit variability in sustaining mechanical output of muscle. In: Gandevia, S., Enoka, R.M., McComas, A.J., Stuart, D.G., Thomas, C.K., eds *Fatigue, neural and muscular mechanisms. Advances in Experimental Medicine and Biology*, Plenum, New York, vol. 384, pp. 323-338.
7. Wilmore J.H., Costill D.L. (1999) *Physiology of Sport and Exercise*. Human Kinetics. Champaign, IL.
8. Żołądź, J.A. (2001) Wydolność fizyczna człowieka, w: Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego. Red. Górski, J. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, str. 456-522.