

Биомеханика раневого заживления

Изучена биомеханика процесса заживления инфицированной раны. Показатели прочности, эластичности и модуля упругости количественно отражают динамику морфогенеза раневых структур и сопутствующих метаболических реакций и могут служить для объективной оценки процесса раневого заживления. Ключевые слова: биомеханика, прочность, эластичность, упругость, рана, заживление.

Yu.K. Abayev, N.R. Prokopchuk

Biomechanics of wound healing .

There were investigated biomechanics of the healing infected wound. The strenght, elasticity and resilience quantitative reflected dinamics morphogenesis of the wound structures and accompanied metabolic reactions and may be used for impartial assessment of wound healing.

Key words: biomechanics, strenght, elasticity, resilience, wound, healing.

При разработке методов и средств, для лечения инфицированных и гнойных ран большое значение имеет объективная оценка процесса раневого заживления, позволяющая характеризовать его в количественных показателях [6,9]. Ранотензиометрия является одним из наиболее точных методов используемых для этой цели [5,11]. Однако существующие методики ранотензиометрии позволяют определить только одну характеристику ? прочность сращения краев раны, что не дает полной информации о деформации на растяжение, а значит и процессе раневого заживления [9].

В механике твердого тела существуют различные виды испытаний ? на сдвиг, кручение, сжатие и растяжение. В естественных условиях раны в большинстве случаев подвергаются усилиям на растяжение. Основными параметрами, характеризующими процесс деформации твердого тела на растяжение, являются показатели прочности на разрыв, относительное удлинение при разрыве (эластичность) и модуль упругости (модуль Юнга). Прочность ? свойство тела противостоять разрушению под действием внешней механической силы [2]. Данный показатель определяется путем деления разрывной силы на площадь поперечного сечения образца, выражается в кг/мм² или Па (паскалях) и применяется для сравнительной оценки образцов с одинаковым поперечным сечением. Эластичность материала характеризуется относительным удлинением тела при разрыве [1] и определяется по формуле:

$$E_p = \frac{l_k - l_n}{l_n} \times 100\%$$

где l_n и l_k ? соответственно начальная и конечная длина образца и выражается в процентах по отношению к начальной длине образца. Модуль упругости характеризует жесткость тела и определяется отношением силы, необходимой для деформирования ткани на 1% к площади поперечного сечения образца, умноженной на 100 и выражается в кг/см² или ПА [7].

Преимуществом определения комплекса данных показателей перед исследованием только прочности, определяемой существующими тензиометрическими методами, является возможность получения при испытаниях на растяжение кроме прочности еще двух важных показателей, характеризующих заживающую рану ? эластичности и модуля упругости. Целью работы являлось изучение биомеханики заживления инфицированной раны в эксперименте с определением показателей прочности, эластичности и модуля упругости.

Материалы и методы

В исследованиях придерживались “Правил проведения работ с использованием экспериментальных животных”. В работе использовали 60 половозрелых белых крыс линии Vistar массой тела 180-220 г. Животных содержали в стандартных условиях вивария со свободным доступом к пище и воде. Модель инфицированной раны создавали по методу А. Moller и В. Rytberg [8]. Крыс анестезировали тиопенталом натрия из расчета 60 мг/кг массы на внутрибрюшное введение и фиксировали на операционном столе. На спине, параллельно позвоночнику наносили линейную рану до мышечного слоя длиной 5 см, в которую вносили 0,2 мл взвеси множественноустойчивого госпитального штамма *St. aureus*, содержащей $2 \cdot 10^9$ микробных тел. Через 30 минут раны ушивали шелковыми узловыми швами (№ 2). Эвтаназию животных осуществляли на 3, 7, 14 и 21 сутки, путем внутрибрюшного введения летальной дозы тиопентала натрия. В эти сроки производили забор материала для тензиометрического исследования.

Биомеханические свойства ран изучали с помощью универсального прибора для механических и термомеханических испытаний полимерных волокон и пленок модели УМИВ-3 (Россия). Полоски кожи 3,5x0,5 см с участками ран закрепляли в разрывном устройстве прибора при расстоянии между зажимами 2,5 см и подвергали деформации. Прибор позволяет производить исследование на растяжение с записью диаграмм нагрузка-деформация (F-E), что дает возможность получить такие параметры как прочность, эластичность и модуль упругости. Погрешность показаний измеряемой нагрузки и деформации не превышала 2% при скоростях деформирования 0,1; 0,5 и 5 мм/мин. Данные регистрировались на диаграмме где находили разрывное усилие F_r (прочность), относительное удлинение образца при разрыве E_r (эластичность) и усилие необходимое для деформирования ткани на 1% ? $F1\%$ (упругость). В связи с тем, что исследованию подвергались стандартные полоски ткани из заживающих ран с постоянной площадью поперечного сечения, прочность и модуль упругости выражали в граммах. Так как наиболее выраженные изменения в ранах происходят на ранних этапах процесса заживления ? в фазах воспаления и регенерации, чаще всего являющихся объектами лечебного воздействия, исследование ограничивали 21 сутками.

Полученные данные обработаны статистическими методами с использованием пакета прикладных программ “Excel 97”.

Результаты и обсуждение

Проведенными исследованиями установлено, что прочность заживающей инфицированной раны увеличивалась в течение всего периода исследования, однако динамика этого процесса была неравномерной (табл.).

Таблица

Прочность, эластичность и модуль упругости ран

Сутки исследования	Прочность (г) F_p	Эластичность (%) E_p	Модуль упругости (г) $F_{1\%}$
3-и	22,8±4,8	16,8±2,0	0,92±0,05
7-е	85,5±9,8	16,8±1,4	3,29±0,36
14-е	272,5±25,5	15,1±1,5	6,37±0,70
21-е	402,4±33,0	22,1±1,0	8,77±0,42
Кожа	1880,0±38,4	21,4±0,2	94,40±2,85

Примечание: Кожа ? кожа экспериментальных животных.

Наиболее выраженный прирост прочности ран происходил до 14 сут. Так, на 7 сут данный показатель составил 270%, на 14 сут ? 220%, а на 21 сут 50% по сравнению с данными предыдущего исследования. По отношению к коже экспериментальных животных, прочность заживающих ран на 7 сут составила 4,5%, на 14 сут ? 14,5% (средние сроки снятия швов после оперативных вмешательств), на 21 сут ? 21,4%. При изучении эластичности ран выявлено, что данный показатель уже через несколько суток после нанесения ран приближался к значению эластичности кожи животных. А именно, на 3 и 7 сут он составлял 70,5%, а на 21 сут даже 103,2% от эластичности кожи. Исследование модуля упругости заживающих ран показало сходство динамики данного показателя и показателя прочности. Так, прирост значений модуля упругости раны на 7 сут по сравнению с предыдущим исследованием составил 260%, на 14 сут ? 94% и на 21 сут ? 40%. В сравнении с модулем упругости кожи экспериментальных животных, данный показатель составил на 7 сут ? 3,6%, на 14 сут ? 6,6% и на 21 сут ? 9,1%.

Как видно из полученных данных, показатели прочности, эластичности и упругости максимальной величины достигали к 21 сут (период наиболее выраженных структурных изменений в заживающей ране). Динамика этих показателей не являлась линейной. Если эластичность раны быстро возрастала и достигала величины эластичности кожи животных, то прочность увеличивалась медленно. Наименее динамичным показателем являлся модуль упругости раны, характеризующий жесткость ткани послеоперационного рубца.

Таким образом, установлено, что показатели прочности, эластичности и модуля упругости объективно характеризуют процесс биомеханики раневого заживления. При сравнении данных показателей у заживающих инфицированных ран и кожи экспериментальных животных выявлено, что эластичность ран восстанавливалась к 21 сут после нанесения ран, тогда как прочность и упругость возрастали значительно медленнее и к 21 сут составляли соответственно 21,4% и 9,3% от данных показателей кожи крыс.

Полученные данные соответствуют литературным сведениям по морфогенезу заживающей раны. Так, фибропластические процессы минимальны в течение первых трех суток после ранения. В течение раннего, так называемого “латентного” периода (lag-фаза), предшествующего продукции коллагена, прочность раны в основном зависит от адгезии эпидермальных клеток [3,5]. Увеличение данного показателя после “латентного” периода обусловлено

главным образом содержанием коллагена [6,10]. Прочность раны заметно возрастает в период образования коллагена, а на более позднем этапе ? в фазе структурной перестройки (ремоделирования) коллагеновых волокон уже не зависит от его количества. В ушитой хирургической ране синтез коллагена достигает максимума с 7 по 21 сут, а затем уменьшается [9]. В отличие от прочности, эластичность раны имеет другую направленность динамики. Величина данного показателя быстро возростала, достигая значения кожи животных к 21 сут. На 3?7 сут эластичность обеспечивается за счет аморфного, промежуточного вещества соединительной ткани, основу которого составляют мукополисахариды [11]. К 14 сут значения данного показателя возрастают за счет фиброплазии, а к 21 сут ? вследствие начинающейся реорганизации коллагеновых структур [5]. Показатель эластичности дает важную дополнительную информацию, поскольку при растяжении ткани большая часть механической энергии затрачивается не на разрушение ткани, а на ее деформирование [2].

Динамика показателей модуля упругости была сходной с динамикой показателей прочности. Модуль упругости менее чувствителен к дефектам в заживающей ране (микроабсцессы, серомы и т.п.), так как характеризует сопротивление деформированной ткани, вследствие чего является более объективной величиной, характеризующей раневой процесс. Сопоставление модулей упругости дает возможность сравнивать между собой мало деформированные ткани в их естественном состоянии. Более высокие значения данного показателя определяют большее внутреннее растягивающее напряжение (жесткость), которое может привести к локальным изменениям твердого тела, при его растяжении на малые величины [4]. Показатели механической прочности, эластичности и модуля упругости раны находятся в прямой зависимости от процессов регенерации и объективно отражают течение последних. Имея конкретное математическое выражение, они могут быть подвергнуты статистической обработке, что облегчает анализ полученных результатов и значительно повышает их научную и практическую ценность.

Выводы

1. Показатели прочности, эластичности и упругости, количественно отражая морфогенез раневых структур, наиболее полно характеризуют биомеханику процесса раневого заживления.
2. Более информативным показателем оценки течения раневого процесса является модуль упругости, который определяет сопротивление деформированию ткани без ее разрушения.
3. Определение показателей прочности, эластичности и модуля упругости целесообразно для использования в экспериментальных исследованиях при разработке новых методов и средств лечения ран.

Литература

1. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. ? М.?Л.: Химия, 1964. ? 387 с.
2. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и химия полимеров. ? М.: Высшая школа, 1983. ? 391 с.

3. Воспаление: Руководство для врачей. /Под ред. В.В. Серова, В.С. Паукова. – М.: Медицина, 1995. – 640 с.
4. Нельсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. ? М.: Химия, 1978. ? 312 с.
5. Раны и раневая инфекция: Руководство для врачей. /Под ред. М.И. Кузина и Б.М. Костюченко. ? 2-е изд. – М.: Медицина, 1990. – 592 с.
6. Теория и практика местного лечения гнойных ран. (Проблемы лекарственной терапии). /Под ред. Б.М. Даценко. – Київ: “Здоров’я”, 1995. – 383 с.
7. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. ? М.: Наука, 1974. ? 640 с.
8. Moller A., Rydberg B. Influence of cationic detergent on the development on infection in experimental wound contaminated with staphylococci. //Acta Chir. Scand. ? 1969. ? V. 135. ? P.459?465.
9. Peacock E., van Winkle W. Wound Repair. ? Philadelphia?London?Toronto: W.B. Saunders, 1976. ? 699 p.
10. Stadelmann W.K., Digenis A.G., Tobin G.R. Physiology and healing dynamics of chronic cutaneous wounds. //Am. J. Surg. ? 1998. ? V.176. ? Suppl. 2A. ? S.26?38.
11. Wound Healing: Biochemical & Clinocal Aspects. /Eds. I.K Cohen., R.F Diegelmann., W.J. Lindblad. ? Philadelphia: W.B. Saunders, 1989.