

МЕДИЦИНА
MEDICINEУДК 615.468.21.011.3:[546.57:546.56]:616.5-001.17-08
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-504-512>Поступило в редакцию 17.11.2025
Received 17.11.2025**А. В. Глуткин¹, В. Г. Богдан², Н. Г. Валько³**¹*Гродненский государственный медицинский университет, Гродно, Республика Беларусь*²*Отделение медицинских наук Национальной академии наук Беларусь, Минск, Республика Беларусь*³*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь***ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОРБЦИОННОЙ РАНЕВОЙ ПОВЯЗКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ СЕРЕБРО И МЕДЬ**

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры и физико-механических свойств сорбционной раневой повязки, содержащей серебро и медь, производства Республики Беларусь. Плотность серебро- и медьсодержащей повязки на 12,6 % выше контрольных целлюлозных раневых повязок. Обнаружено, что плотность серебро- и медьсодержащих повязок после использования в I фазу раневого процесса при ожоговой ране у детей в течение 48 ч снижается на 28,3 % ($p < 0,001$), в объеме раневой повязки концентрация меди – на 22,9 % ($p < 0,001$), концентрация серебра – на 82,1 % ($p < 0,001$). Установлено, что коэффициент динамического трения серебро- и медьсодержащей повязки после использования увеличивается на 4,1 %, что доказывает атравматичность применения данного медицинского изделия в процессе динамической эксплуатации. Обнаружено, что при нанесении серебро- и медьсодержащей добавки на раневую повязку сила на разрыв раневого покрытия повышается до 47,74 Н, а после эксплуатации снижается до 11,78 Н.

Ключевые слова: раневая повязка, серебро, медь, ожог, плотность, упругопрочностные свойства, коэффициент трения

Для цитирования. Глуткин, А. В. Исследование физико-механических свойств сорбционной раневой повязки, содержащей серебро и медь / А. В. Глуткин, В. Г. Богдан, Н. Г. Валько // Доклады Национальной академии наук Беларусь. – 2025. – Т. 69, № 6. – С. 504–512. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-504-512>

Aliaksandr V. Hlutkin¹, Vasiliy G. Bogdan², Natalia G. Valko³¹*Grodno State Medical University, Grodno, Republic of Belarus*²*Department of the Medical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*³*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus***STUDY OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF A SORBENT WOUND DRESSING CONTAINING SILVER AND COPPER**

Abstract. This study presents the results of an investigation into the structure and physico-mechanical properties of an absorbent wound dressing containing silver and copper, produced in the Republic of Belarus. The density of the silver- and copper-containing dressing was 12.6 % higher than that of the control cellulose-based wound dressings. It was found that after 48 hours of use on pediatric burn wounds during the first phase of the wound process, the density of the silver- and copper-containing dressings decreased by 28.3 % ($p < 0.001$). Concurrently, the copper concentration within the dressing volume decreased by 22.9 % ($p < 0.001$), and the silver concentration decreased by 82.1 % ($p < 0.001$). The coefficient of dynamic friction of the used silver- and copper-containing dressing increased by 4.1 %, indicating the low-adherence (atraumatic) properties of this medical device during clinical use. Furthermore, the application of the silver and copper additive increased the tearing force of the wound dressing to 47.74 N, which subsequently decreased to 11.78 N after use.

Keywords: wound dressing, silver, copper, burn, density, elastic-strength properties, coefficient of friction

For citation. Hlutkin A. V., Bogdan V. G., Valko N. G. Study of the physico-mechanical properties of a sorbent wound dressing containing silver and copper. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 6, pp. 504–512. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-6-504-512>

Введение. Проблема ожогового травматизма не теряет актуальности в настоящее время. В современных социально-экономических условиях возрастает значение эффективного и быстрого заживления раневых дефектов, важно обеспечить комфорт лечения, чтобы совместить оптимальный терапевтический эффект и качество жизни пациента [1].

По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно от ожогов в мире умирают более 180 000 человек. Термические повреждения являются пятой по значимости причиной несмертельных детских травм. Педиатрические пациенты составляют почти половину среди всех пострадавших от ожоговых травм в мире (42 %), а дети младшего возраста (от года до 5 лет) – наибольшую их долю среди детей (62 % детей в возрасте до 18 лет, 26 % всех случаев ожоговых травм) [2].

Наиболее часто дети получают поверхностные ожоги, но обширные по площади. Профилактика инфекций имеет решающее значение при их лечении, особенно в I фазу раневого процесса [2; 3].

Современные принципы развития методов лечения ран реализуются в направлении совершенствования раневых покрытий. В настоящее время активно ведутся работы по созданию новых перевязочных средств, а также по модификации существующих для формирования требуемых эксплуатационных свойств с учетом особенностей генеза и специфики заживления ран в ранние сроки после их возникновения [1; 4; 5]. Важно отметить, что частая смена повязок, требующаяся в обычных условиях, также может негативно влиять на реэпителизацию и задерживать заживание раны [4].

В данный момент в мире насчитывается более 350 видов раневых повязок в разных формах: традиционные (вата, натуральные или синтетические бинты и сетки), современные (гидроколлоиды, альгинаты, гидрогели, полупроницаемые адгезивные пленки, пены, биологические повязки и тканевые заменители кожи) [1; 6]. Современные перевязочные средства должны обладать следующими критериями: быть удобными, легко меняться, не нарушать кровоснабжение и иннервацию, не сковывать движения пациента, быть гипоаллергенными, а также обеспечивать длительное лечение за счет постепенного дозированного поступления лекарственного вещества в рану. Одновременно с этими критериями перевязочный материал должен быть экономически доступным для пациента и учреждения здравоохранения, удобным для использования медицинским персоналом. Эти требования важно соблюдать при лечении ран у детей, так как кожа у них имеет свои возрастные особенности [1; 6].

Для предотвращения инфекций и ускорения заживления ран активно применяются раневые повязки с антимикробным действием. Для защиты раны от инфекций наиболее широко используются противомикробные повязки с серебром. Серебросодержащие повязки представляют особенный интерес для ожоговой терапии, поскольку они могут оказывать профилактическое действие предупреждая развитие инфекции в течение первых 48 ч после ожога [7].

Серебросодержащие повязки изготавливаются различными методами, включая: ионное и электрохимическое осаждение, нанесение коллоидного серебра, введение серебросодержащих соединений. Основными требованиями к методам нанесения серебросодержащего слоя является обеспечение равномерного распределения частиц серебра по поверхности перевязочного материала, а также гарантированное нахождение частиц серебра в перевязочном материале без возможности их диффундирования в кожу пациента, сохраняя при этом свои бактерицидные свойства. Важным после нанесения серебросодержащего слоя на перевязочный материал является также сохранение его эластичности, трибологических характеристик и поглощающей способности.

В связи с этим актуальным вопросом является разработка новых серебросодержащих перевязочных материалов с высокими упруго-прочностными и трибологическими свойствами для ожоговой медицины и обеспечения терапевтического эффекта при лечении тяжелых ожоговых поражений и связанных с ними патологических состояний.

Цель работы – провести сравнительный анализ структуры и физико-механических свойств сорбционной серебро- и медьюсодержащей раневой повязки производства Республики Беларусь, используемой для лечения ожоговых ран у детей в I фазу раневого процесса.

Материалы и методы исследования. В качестве основного объекта исследования были выбраны образцы ($n = 10$) сорбционных раневых повязок, содержащих серебро и медь (ТУ BY 100144378.007-2021, регистрационное удостоверение № ИМ-7.110814, производство Республика Беларусь), которые применяли для лечения ожоговых ран у детей в течение первых двух суток после травмы. Перед испытаниями образцы сушились в течение суток при комнатной температуре. Объектом сравнения служили образцы сорбционных раневых повязок, содержащих серебро и медь, без эксплуатации ($n = 10$) и сорбционные раневые повязки без содержания серебра и меди (контрольная повязка, $n = 10$).

Структура сорбционной раневой повязки, содержащей серебро и медь, представлена двумя слоями. Первый слой повязки – мягкий внутренний компонент, находящийся в контакте с раневой поверхностью, импрегнированный смесью элементов серебра и меди, второй – водонепроницаемый перфорированный наружный слой, который удерживает экссудат внутри повязки, обеспечивает «вертикальный дренаж», предотвращает развитие инфекции в ране.

С целью контроля состава раствора, используемого для нанесения согласно ТУ BY 100144378.007-2021, с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455VP (РЭМ) при нормальном падении пучка на поверхность образца и ускоряющем напряжении 20 кВ была исследована морфология поверхности высохших капель используемого раствора и его элементный состав. Установлено, что осажденные серебро- и медьсодержащие частицы имеют сферическую форму, а их размер варьирует в интервале от 20 до 50 нм.

Рентгеноспектральный микроанализ исследуемых капель с помощью безазотного спектрометра Aztec Energy Advanced X-Max 80 (Oxford Instruments, Англия) показал наличие 3,2 вес. % меди и 1 вес. % серебра.

Оценка элементного состава серебро- и медьсодержащих раневых повязок проведена методом рентгеновской флуоресценции на спектрометре СЕР-01 ElvaX (Украина).

Определение плотности исследуемых повязок производилось по методу измерения веса раневой повязки в воздухе и в дистиллированной воде с помощью лабораторных весов HR-250AZG с точностью до 0,0001 г и специализированного набора для измерения плотности AD-1654.

Плотность рассчитывалась по формуле

$$\rho = \frac{M}{|B|} (\rho_0 - d) + d,$$

где ρ – плотность образца ($\text{г}/\text{см}^3$); M – масса образца; B – вес образца в жидкости (г); ρ_0 – плотность жидкости ($\text{г}/\text{см}^3$); d – плотность воздуха.

Погрешность измерений оценивалась как среднее квадратичное отклонение по 10 измерениям и не превышала 5 %.

Статический и динамический коэффициенты трения изучаемых образцов, а также сила трения определялись с помощью прибора MXD-02 в соответствии со стандартом ISO 8295-1986¹. Погрешность измерений оценивалась как среднее квадратичное отклонение по 10 измерениям и не превышала 2 %.

Измерение упругопрочных свойств раневых повязок проводили на электромеханической универсальной испытательной машине настольного типа Kason WDW-5. Измерялась сила на разрыв и относительное удлинение образцов перевязочного материала. Погрешность измерений оценивалась как среднее квадратичное отклонение по 10 измерениям и не превышала 3 %.

Статистический анализ проводили общепринятыми методами. Количественные показатели оценивали на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро–Уилка. Количественные показатели, выборочное распределение которых соответствовалоциальному, описывались с помощью средних арифметических величин (M) и стандартных отклонений (SD). В качестве меры репрезентативности для средних значений указывали границы 95 %-ного доверительного интервала (95 % ДИ). В случае отсутствия нормального распределения

¹ ISO 8295-1986. International standard. Plastics – film and sheeting – Determination of the coefficients of friction. – Swedish standards institution, 1996. – 6 p.

ния количественные данные представлены в виде медианы ($Мe$), нижний и верхний quartиль ($Q1-Q3$). Сравнение двух групп по количественному показателю, распределение которого в каждой из групп соответствовало нормальному, при условии равенства дисперсий выполняли с помощью t -критерия Стьюдента. Сравнение двух групп по количественному показателю, распределение которого отличалось от нормального, выполняли с помощью U -критерия Манна–Уитни. Сравнение трех и более групп по количественному показателю, распределение которого в каждой из групп соответствовало нормальному, проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа, апостериорные сравнения осуществляли с помощью критерия Тьюки (при условии равенства дисперсий), критерия Геймса–Хауэлла (при неравных дисперсиях). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что после использования сорбционной раневой повязки, содержащей серебро и медь, раневая поверхность розового цвета, блестящая. Количество экссудата в раневом ложе умеренное, гнойного отделяемого нет, окружающая кожа вокруг раны сухая, кровоточивость, боль, запах из раны при удалении повязки отсутствуют.

Одним из условий успешного заживления ожоговой раны является предотвращение ее инфицирования. Высокая пористость целлюлозного материала и сферическая форма наноразмерных частиц серебра и меди способствуют их проникновению в объем раневой повязки и равномерному распределению. Для подтверждения данного предположения были проведены исследования раневых повязок на предмет наличия серебра и меди при лечении ожоговой раны до и после использования.

На рис. 1 и 2 приведены спектры флуоресценции от сорбционной раневой повязки, содержащей серебро и медь, до использования и такой же повязки после использования на ожоговой ране.

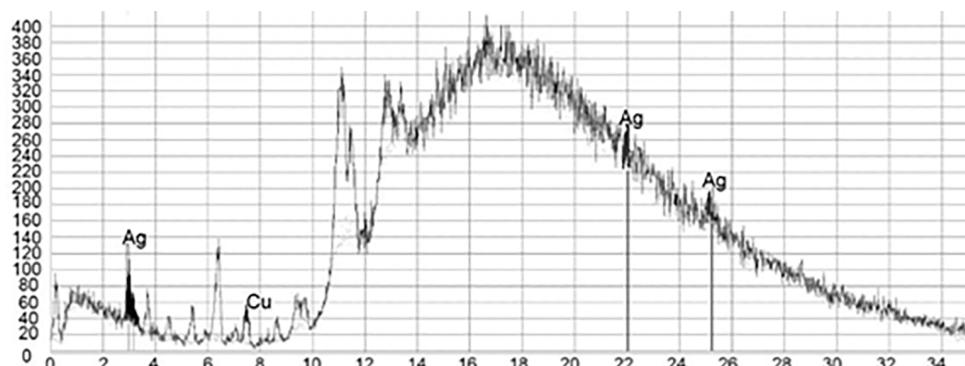


Рис. 1. Спектр флуоресценции от образца сравнения (сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования)

Fig. 1. Fluorescence spectrum of the control sample (sorption wound dressing containing silver and copper before use)

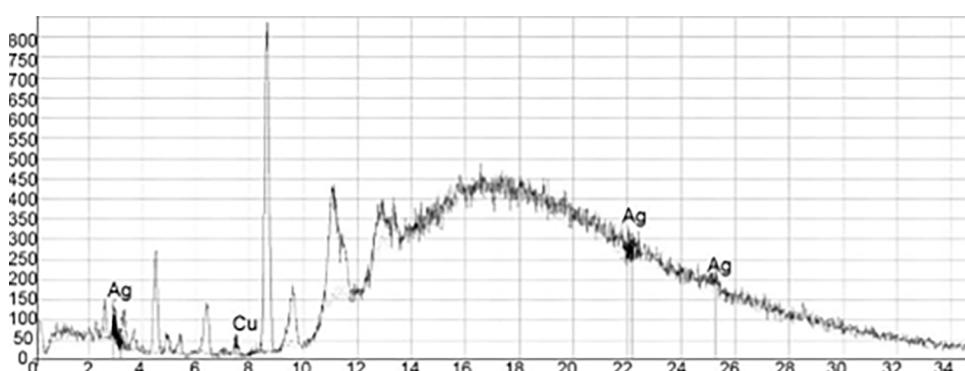


Рис. 2. Спектр флуоресценции от раневой повязки, содержащей серебро и медь, после использования

Fig. 2. Fluorescence spectrum of the wound dressing containing silver and copper after use

Проведенный сравнительный анализ спектральных данных выявил присутствие частиц меди и серебра в исследуемых образцах повязок. Исследование элементного состава по толщине раневых повязок показало, что в повязке до использования содержание серебра составляло $1,84 \pm 0,14$ мкг/г, а меди – $3,67 \pm 0,32$ мкг/г. После применения раневой повязки концентрация меди снижается на 22,9 % (до $2,83 \pm 0,59$ мкг/г соответственно при $p < 0,001$) и концентрация серебра снижается на 82,1 % (до $0,33 \pm 0,28$ мкг/г соответственно при $p < 0,001$), что свидетельствует о значительной миграции antimикробных металлов из структуры повязки в раневую среду в процессе эксплуатации.

Полученные результаты позволяют предположить, что миграция указанных элементов ограничивается областью раневого дефекта без признаков системного распределения в организме.

При исследовании контрольных раневых повязок, их плотность составила $124,50 \pm 5,99$ кг/м³. Нанесение на повязку серебро- и медьсодержащего раствора приводило к увеличению плотности на 12,6 %, $p < 0,001$ (табл. 1). Ионы серебра (Ag^+) и меди (Cu^{2+}) являются многовалентными катионами. Они способны образовывать координационные связи с электронными парами кислорода в гидроксильных группах разных целлюлозных цепей. Таким образом, один ион металла выступает в роли «мостики», связывая соседние волокна целлюлозы между собой, а раневая повязка теряет свою рыхлость и становится более плотной.

Таблица 1. Плотность исследуемых раневых повязок (кг/м³)

Table 1. Density of the investigated wound dressings (kg/m³)

Образец Sample	Плотность при разных условиях эксперимента, кг/м ³ Density under different experimental conditions, kg/m ³		p
	До использования Before use	После применения After use	
	$M \pm SD / 95\% \text{ДИ}$		
Сорбционная повязка (контроль)	$124,50 \pm 5,99$ (120,22–128,78)	—	
Сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь	$140,20 \pm 4,39^{\#}$ (137,06–143,34)	$101,10 \pm 4,63$ (97,79–104,41)	$<0,001^*$

Примечания: * – статистически значимые различия внутри группы ($p < 0,001$, t -критерий Стьюдента); [#] – статистически значимые различия по отношению к контролю ($p < 0,001$, t -критерий Стьюдента).

Notes: * – indicates a statistically significant difference within the group ($p < 0,001$, Student's t -test); [#] – indicates a statistically significant difference compared to the control group ($p < 0,001$, Student's t -test).

Обнаружено, что плотность сорбционной раневой повязки, содержащей серебро и медь, после использования в I фазу раневого процесса при ожоговой ране у детей в течение 48 ч снижается на 28,3 %, $p < 0,001$. Снижение плотности исследуемой сухой раневой повязки является закономерным физическим процессом, обусловленным циклом гидратации и дегидратации материала. Данный цикл включает последовательные стадии: абсорбция влаги из раневой среды, последующее набухание волокон, испарение влаги и, как следствие, необратимое изменение микроструктуры перевязочного материала. Наблюдаемое явление свидетельствует о выполнении повязкой ее основной функции – абсорбции экссудата и управления микросредой раны.

Важнейшими механическими свойствами раневых повязок, подтверждающими их атравматичность, являются трибологические и упругопрочностные свойства. Анализ результатов, полученных при исследовании трибологических характеристик раневой повязки, показал, что зависимости силы трения от времени нагружения для контрольных раневых повязок и серебро- и медьсодержащих имеют одинаковый вид изменения силы трения (рис. 3). На участках 0–1, характеризующих силу трения покоя, она постепенно возрастает по мере роста приложенной силы. Данный участок заканчивается максимальным значением силы трения, после которого раневая повязка приходит в движение, которое, в свою очередь, характеризуется динамическим коэффициентом трения. Горизонтальный участок указывает на постоянную нормальную силу и характеризуется динамическим коэффициентом трения.

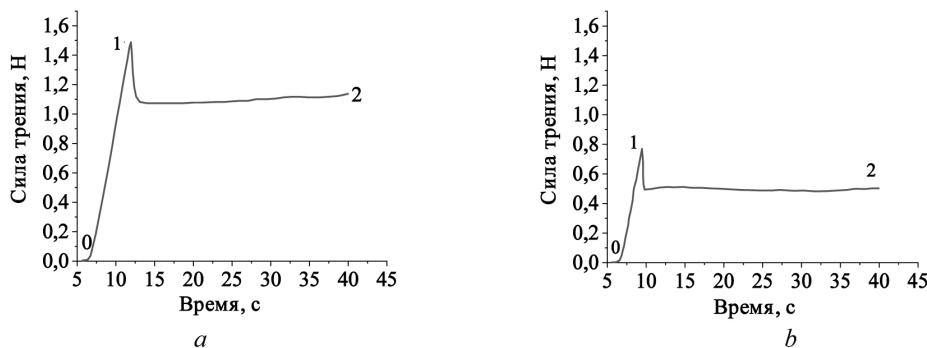


Рис. 3. Зависимость силы трения от времени нагружения:
а – контрольная повязка; б – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь

Fig. 3. Dependence of frictional force on loading time:
a – control dressing; b – sorption wound dressing containing silver and copper

Численные значения максимальной силы трения и коэффициента динамического трения изучаемых раневых повязок представлены в табл. 2. Значение силы трения у серебро- и медьсодержащей раневой повязки до использования снижается в 1,8 раза ($p < 0,001$) относительно контрольной повязки. Важно отметить, что коэффициент динамического трения серебро- и медьсодержащей раневой повязки до использования был ниже по отношению к группе контроля и к сорбционной раневой повязке, содержащей серебро и медь, после использования.

Т а б л и ц а 2. Трибологические характеристики раневых повязок

T a b l e 2. Tribological characteristics of wound dressings

Образец Sample	Коэффициент динамического трения Coefficient of dynamic friction	p	Максимальная сила трения, Н Maximum friction force, N	p
			$Me (Q_1 - Q_3)$	
Сорбционная повязка (контроль)	$0,52 \pm 0,01$ (0,51–0,52)	<0,001*	1,46 (1,45–1,47)	=0,002 [#]
Сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования	$0,49 \pm 0,01^*$ (0,48–0,50)		0,80 [#] (0,80–0,81)	
Сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, после использования	$0,51 \pm 0,01$ (0,50–0,52)		—	

П р и м е ч а н и я: * – $p < 0,001$, сорбционная раневая повязка – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования; $p = 0,014$, сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, после использования (F -критерий Фишера); [#] – статистически значимые различия (U -критерий Манн–Уитни).

N o t e s: * – $p < 0,001$ for control sorbent dressing vs. Ag-Cu dressing (before use); $p = 0,014$ for Ag-Cu dressing (before use) vs. Ag-Cu dressing (after use) (Fisher's F -test); [#] – statistically significant differences (Mann–Whitney U -test).

Поверхность повязки без содержания серебра и меди состоит из целлюлозы, а ее волокна имеют микрощероховатость и гидрофильность, что может создавать умеренное трение. Волокна повязки с содержанием серебра и меди покрыты тонким слоем пропитки, содержащей наночастицы металлов. Этот слой часто включает полимерные связующие: фиксируются активные металлы на волокне и сглаживается микрорельеф поверхности, действуя как подобие «полироли».

Происходит изменение поверхностной энергии: повязка без содержания серебра и меди обладает высокой поверхностной энергией и гидрофильностью, что способствует более тесному молекулярному контакту и адгезии с другими поверхностями. Модифицирование поверхностной энергии может осуществляться повязкой с содержанием серебра и меди, делая ее более гидрофобной или инертной. Это ослабляет адгезионную составляющую трения (силы молекулярного притяжения между поверхностями).

Однако обнаружено, что коэффициент динамического трения раневой повязки с содержанием серебра и меди после эксплуатации на ожоговой ране возрастает на 4,1 %, $p < 0,014$ по отно-

шению к повязке с содержанием серебра и меди без эксплуатации и снижается на 1,9 % по отношению к контролю, $p > 0,05$.

В результате контакта раневой повязки, содержащей серебро и медь, с ожоговой раной на поверхности волокон закрепляются белки и эти структуры образуют неоднородный слой. Поверхность повязки насыщается высокомолекулярными биополимерами (белками), которые сами по себе обладают высоким коэффициентом трения. Кроме того, влага, удерживаемая в повязке, не является чистым растворителем – это вязкий раствор белков и электролитов, который не выполняет роль эффективной смазки. Ионы серебра и меди коагулируют эти белки, создавая прочные поперечные связи не только между белками раневого экссудата, но и между структурными элементами самой повязки.

Таким образом, увеличение коэффициента динамического трения на 4,1 % – это прямое следствие трансформации поверхности повязки в результате ее функционирования. Целлюлозные волокна превращаются в жесткий, шероховатый, «сшитый» ионами металлов биополимерный композит, который обладает принципиально иными трибологическими (трения) свойствами. Это не дефект, а индикатор активного взаимодействия повязки с раневой средой.

Раневая повязка, содержащая серебро и медь, имеет надежную фиксацию и стабильность, что гарантирует повязке возможность оставаться на своем месте, не смещаясь и не комкаясь, обеспечивая постоянное защитное и терапевтическое воздействие. За счет плотного контакта повязки с раневым ложем происходит активное впитывание экссудата или доставка веществ (частицы серебра и меди) в рану.

Полученные результаты имеют высокую клиническую значимость, поскольку они доказывают атравматичность использования данного медицинского изделия в процессе динамической эксплуатации при лечении ожоговых ран за счет способности материала противостоять усилию, направленному вдоль плоскости контакта с подложкой.

При оценке раневых повязок важным аспектом является способность материала деформироваться под нагрузкой и полностью восстанавливать свою первоначальную форму и размеры после того, как нагрузка снята. Поэтому интерес представляло исследование упругопрочных свойств (относительное удлинение, сила на разрыв) раневых повязок после их использования при лечении ожоговых ран. Такие повязки позволяют оценить анатомическое соответствие, комфорт при движении, целостность при наложении и снятии.

При исследовании упругопрочных свойств раневых повязок после их использования при лечении ожоговых ран построены кривые зависимости приложенной силы от удлинения, которые приведены на рис. 4.

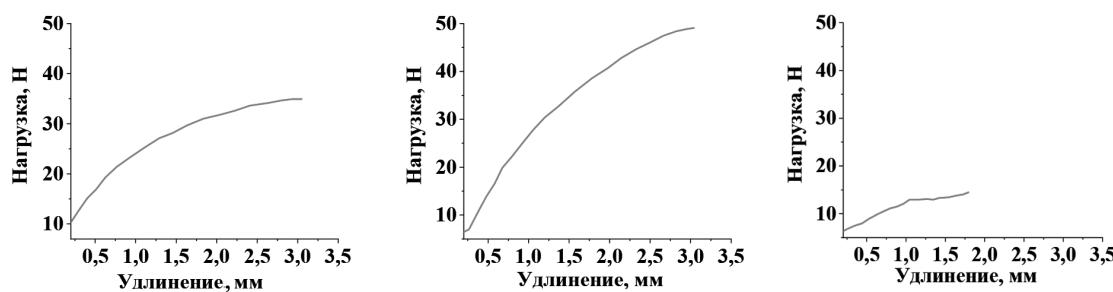


Рис. 4. Кривые зависимости упругопрочных свойств перевязочного материала: *a* – контрольная повязка; *b* – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования; *c* – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, после использования

Fig. 4. Curves showing the dependence of elastic and strength properties of the dressing material: *a* – control dressing; *b* – sorption wound dressing containing silver and copper before use; *c* – sorption wound dressing containing silver and copper after use

Кривые зависимостей для контрольной раневой повязки, а также для повязок, содержащих серебро и медь, до использования и после использования, отличаются по виду и по значениям удлинения от приложенной нагрузки. При этом при одинаковых удлинениях серебро- и медьсодержащие раневые повязки после использования характеризуются минимальными значениями

приложенной силы, что согласуется с результатами, полученными при изучении плотности повязок. Наблюдаемое снижение приложенной силы при удлинении и обнаруженное уменьшение плотности являются взаимодополняющими признаками одного и того же процесса – структурной деградации и разупрочнения материала повязки под воздействием физико-химических процессов в раневой среде, катализируемых ионами металлов. Оба параметра указывают на потерю материалом своей первоначальной жесткости.

В табл. 3 представлены результаты определения предельных значений относительного удлинения и предельной силы на разрыв раневых повязок.

Т а б л и ц а 3. Упругопрочностные свойства раневых повязок

T a b l e 3. Elastic and strength properties of wound dressings

Образец Sample	Относительное удлинение, % Relative elongation, %	<i>p</i>	Сила на разрыв, Н Tensile strength, N	<i>p</i>
			M ± SD / 95 % ДИ	
Сорбционная повязка (контроль)	2,00 ± 0,03 (1,97–2,02)	< 0,001*	35,33 ± 0,57 (34,92–35,74)	<0,001 [#]
Сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь до использования	3,30 ± 0,05 (3,27–3,33)		47,74 ± 1,06 (46,98–48,50)	
Сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь после использования	3,23 ± 0,04 (3,20–3,25)		11,78 ± 0,21 (11,63–11,93)	

П р и м е ч а н и я: * – $p < 0,001$, сорбционная раневая повязка – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования; $p < 0,001$, сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, после использования (*F*-критерий Фишера); [#] – $p < 0,001$, сорбционная раневая повязка – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, до использования; $p < 0,001$, сорбционная раневая повязка – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, после использования; $p < 0,001$, сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь до использования – сорбционная раневая повязка, содержащая серебро и медь, после использования (*F*-критерий Уэлча).

N o t e s: * – $p < 0,001$ for all pairwise comparisons between the following groups: control sorbent dressing, Ag-Cu dressing (before use), and Ag-Cu dressing (after use) (Fisher's *F*-test); [#] – $p < 0,001$ for all pairwise comparisons between the following groups: control sorbent dressing, Ag-Cu dressing (before use), and Ag-Cu dressing (after use) (Welch's *F*-test).

Обнаружено, что у контрольной раневой повязки значение силы на разрыв составляет 35,33 Н, при нанесении серебро- и медьсодержащей добавки сила на разрыв повышается до 47,74 Н, а после эксплуатации снижается до 11,78 Н.

Из табл. 3 видно, что относительное удлинение раневой повязки после эксплуатации также снизилось. Благодаря структурной целостности, повязка сохраняет свою прочность и эластичность даже во влажном состоянии после пропитывания биологическим материалом из ожоговой раны. Это гарантирует извлечение повязки из раны единственным фрагментом без разрывов.

Изученные упругопрочностные характеристики исследуемой раневой повязки подтвердили ее функциональность, надежность и удобство в использовании.

Таким образом, сорбционная раневая повязка, содержащая элементы серебра и меди, характеризуется повышенной эластичностью, атравматичностью, абсорбией и может быть успешно использована в лечении ожоговых ран в I фазу раневого процесса.

Заключение. Исследована структура и физико-механические свойства серебро- и медьсодержащих раневых повязок производства Республики Беларусь, разработанных согласно ТУ ВУ 100144378.007-2021. Показано снижение плотности серебро- и медьсодержащих повязок после использования в I фазу раневого процесса при ожоговой ране у детей в течение 48 ч на 28,3 % ($p < 0,001$), концентрации меди в объеме раневой повязки на 22,9 % ($p < 0,001$), а концентрации серебра – на 82,1 % ($p < 0,001$).

Установлено, что коэффициент динамического трения серебро- и медьсодержащей повязки после использования увеличивается на 4,1 %, что доказывает атравматичность использования данного медицинского изделия в процессе динамической эксплуатации. Обнаружено, что у контрольной раневой повязки значение силы на разрыв составляет 35,33 Н, при нанесении серебро- и медьсодержащей добавки сила на разрыв раневой повязки повышается до 47,74 Н, а после эксплуатации снижается до 11,78 Н ($p < 0,001$).

Таким образом, проведено изучение неадгезивной атравматической, высокоэластичной сорбционной раневой повязки, содержащей элементы серебра и меди, которая может быть успешно использована в лечении ожоговых ран.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список использованных источников

- Современный ассортимент, свойства и перспективы совершенствования перевязочных средств для лечения ран / А. В. Майорова, Б. Б. Сысуев, И. А. Ханалиев, И. В. Вихрова // Фармация и фармакология. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 4–32. <https://doi.org/10.19163/2307-9266-2018-6-1-4-32>
- Global trends in pediatric burn injuries and care capacity from the World Health Organization Global Burn Registry / K. C. Jordan, J. L. Di Gennaro, A. von Saint André-von Arnim, B. T. Stewart // Frontiers in Pediatrics. – 2022. – Vol. 10. – Art. 954995. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.954995>
- Оборкина, Д. С. Перспективы совершенствования первичной медико-санитарной помощи детям с термической травмой / Д. С. Оборкина, Д. Д. Долотова, Л. И. Будкевич // Детская хирургия. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 174–178. <https://doi.org/10.18821/1560-9510-2021-25-3-174-178>
- Сравнительная оценка многофункциональных раневых покрытий на основе хитозана: многоэтапное рандомизированное контролируемое экспериментальное исследование / Д. И. Ушмаров, А. С. Гуменюк, С. Е. Гуменюк [и др.] // Кубанский научный медицинский вестник. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 78–96. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2021-28-3-78-96>
- Свойства, преимущества и показания к применению современных биоактивных и интерактивных раневых покрытий / А. П. Остроушко, К. С. Ян, А. Ю. Лаптиёва [и др.] // Политравма. – 2024. – № 4. – С. 92–103. <https://doi.org/10.24412/1819-1495-2024-4-92-103>
- Современные перевязочные материалы в хирургии, современные мировые тенденции / Н. А. Медведева, М. В. Редькина, П. Р. Пенджиева, М. А. Мельникова // FORCIPE. – 2023. – Т. 6, № 3. – С. 52–53.
- Skin burns: Review of molecular mechanisms and therapeutic approaches / L. Roshangar, J. S. Rad, R. Kheirjou [et al.] // Wounds. – 2019. – Vol. 31, N 12. – P. 308–315.

References

- Mayorova A. V., Syisuev B. B., Hanalieva I. A., Vihrova I. V. Modern assortment, properties and perspectives of medical dressings improvement of wound treatment. *Farmatsiya i farmakologiya = Pharmacy and Pharmacology*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 4–32 (in Russian). <https://doi.org/10.19163/2307-9266-2018-6-1-4-32>
- Jordan K. C., Di Gennaro J. L., von Saint André-von Arnim A., Stewart B. T. Global trends in pediatric burn injuries and care capacity from the World Health Organization Global Burn Registry. *Frontiers in Pediatrics*, 2022, vol. 10, art. 954995. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.954995>
- Oborkina D. S., Dolotova D. D., Butkevich L. I. Prospects for improving primary health care to children with thermal injuries. *Detskaya khirurgiya = Russian Journal of Pediatric Surgery*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 174–178 (in Russian). <https://doi.org/10.18821/1560-9510-2021-25-3-174-178>
- Ushmarov D. I., Gumenyuk S. E., Gumenyuk A. S., Gayvoronskaya T. V., Karablinna S. Ya., Pomortsev A. V., Sotnichenko A. S., Melkonyan K. I., Grigoriev T. E. Comparative evaluation of chitosan-based multifunctional wound dressings: a multistage randomised controlled experimental trial. *Kubanskii nauchnyi meditsinskii vestnik = Kuban Scientific Medical Bulletin*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 78–96 (in Russian). <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2021-28-3-78-96>
- Ostroushko A. P., Yan K. S., Laptiyova A. Yu., Andreev A. A., Glukhov A. A., Aralova M. V., Mikulich E. V., Konovalov P. A. Properties, advantages and indications for the use of modern bioactive and interactive wound coatings. *Politravma = Polytrauma*, 2024, no. 4, pp. 92–103 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/1819-1495-2024-4-92-103>
- Medvedeva N. A., Redkina M. V., Pendzhieva P. R., Melnikova M. A. Modern dressing materials in surgery, modern global trends. *FORCIPE*, 2023, vol. 6, no. 3, pp. 52–53 (in Russian).
- Roshangar L., Rad J. S., Kheirjou R., Ranjkesh M. R., Khosroshahi A. F. Skin burns: review of molecular mechanisms and therapeutic approaches. *Wounds*, 2019, vol. 31, no. 12, pp. 308–315.

Информация об авторах

Глуткин Александр Викторович – канд. мед. наук, доцент. Гродненский государственный медицинский университет (ул. Горького, 80, 230009, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: glutkinalex@mail.ru. ORCID: 0000-0002-2058-7174.

Богдан Василий Генрихович – д-р мед. наук, профессор, академик-секретарь. Отделение медицинских наук НАН Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: medic@presidium.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-7849-6497.

Валько Наталья Георгиевна – д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (ул. Поповича, 50-117, 230024, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: n.valko@grsu.by. ORCID: 0009-0009-5269-0043.

Information about the authors

Glutkin Aliaksandr V. – Ph. D. (Medicine), Associate Professor. Grodno State Medical University (80, Gorky Str., 230009, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: glutkinalex@mail.ru. ORCID: 0000-0002-2058-7174.

Bogdan Vasily G. – D. Sc. (Medicine), Professor, Academic Secretary. Department of Medical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: medic@presidium.bas-net.by. ORCID: 0000-0001-7849-6497.

Valko Natalya G. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department Yanka Kupala State University of Grodno (50-117, Popovich Str., 230024, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: n.valko@grsu.by. ORCID: 0009-0009-5269-0043.