

УДК 537.533;616.71-001.5-089.84

## ПОЛИРОВКА ПОВЕРХНОСТИ СПИЦЫ АППАРАТА ЧРЕСКОСТНОГО ОСТЕОСИНТЕЗА С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА СУБМИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИХ ЗАТОЧКОЙ

Н.Н. Коваль, А.Д. Тересов, А.В. Штейнле\*

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

\*Томский военно-медицинский институт МО РФ

E-mail: tad514@sibmail.com

*Для уменьшения травмирующего воздействия спиц для чрескостного остеосинтеза предложена и отработана технология полировки поверхности спиц с помощью импульсного электронного пучка субмиллисекундной длительности, генерируемого источником электронов с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления, входящим в состав вакуумной установки «СОЛО». Разработан способ заточки торцевой части спицы в виде сверла. Установлено, что предложенная полировка поверхности спицы в сочетании с новой формой заточки позволяют сократить время проведения их через костную ткань, уменьшить нагрев и снизить травмирующее воздействие спицы на протяжении всего срока иммобилизации.*

### **Ключевые слова:**

*Электронный пучок, плазменный катод, электронно-пучковая полировка, чрескостный остеосинтез.*

### **Key words:**

*Electron beam, plasma cathode, electron beam polishing, transosseus osteosynthesis.*

### **Введение**

Предложенный в 1951 г. Г.А. Илизаровым метод чрескостного остеосинтеза стал знаменательной вехой в развитии хирургии повреждений конечностей. Надёжная иммобилизация, минимальная инвазивность, возможности «бескровной» репозиции, мобильность пострадавших и другие преимущества сделали данный метод самым перспективным среди применяемых в оперативном лечении. Но, к сожалению, почти 60-летний опыт применения чрескостного остеосинтеза подтвердил, что и он не лишён недостатков [1]. Это связано, в частности, с одновременными механическим и термическим травмирующими воздействиями спиц на кости и мягкие ткани конечностей.

Проведение через костную ткань спиц с классической трёхгранной и менее распространённой копьевидной заточками требуют, даже при использовании автоматической пистолетной дрели, значительных механических усилий со стороны хирурга [1, 2]. Как следствие наступает ожог тканей. Спицы с обоими вариантами заточек формируют спицевой канал путём раздавливания костной ткани подобно вколачиванию бетонной сваи в землю при подготовке строительных работ. Кроме того, спицу с копьевидной заточкой трудно проводить через костную ткань на малых оборотах, а внешне, на первый взгляд, гладкая поверхность спиц не совсем является таковой. Всё вышеперечисленное приводит к нагноению в местах проведения спиц, развитию «спицевого остеомиелита» в 4,8...15 % случаев и необходимости скорейшего удаления из уже смонтированной металлоконструкции аппарата чрескостного остеосинтеза одной или нескольких спиц [1–3]. В результате страдает качество иммобилизации, что приводит к послеоперационным осложнениям и неудовлетворительным результатам лечения.

Сегодня в арсенале средств снижения травмирующего воздействия спиц аппарата чрескостного остеосинтеза имеются импульсные источники электронов на основе плазменного катода, которые в последнее время активно используют для исследовательских и технологических работ по модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов [4, 5]. Перспективность использования таких источников для электронно-пучковой полировки и упрочнения поверхности спиц обусловлена возможностью: получения импульсов суб- и миллисекундного диапазона длительности, работы в частотном режиме, плавной и независимой регулировкой параметров пучка (тока, ускоряющего напряжения, длительности импульса и частоты следования импульсов). Это позволяет оптимизировать процесс обработки.

Поэтому целью нашего исследования была оптимизация атравматичности спиц для чрескостного остеосинтеза. Достижение поставленной цели включало в себя: снижение нагрева острия спицы при прохождении через костные структуры и устранение эффекта механического раздавливания (вколачивания) элементов костной ткани при прохождении через них спицы во время операции за счёт изменения формы заточки и сведение к минимуму травмирующего воздействия уже стабилизированной в аппарате чрескостного остеосинтеза спицы на костную ткань, формирующую спицевой канал, в течение всего срока иммобилизации за счёт электронно-пучковой полировки её поверхности.

### **Планирование, организация, материал и методы исследования**

В качестве образцов использовались спицы длиной 250 мм, Ø1,5 мм, применяемые для аппарата чрескостного остеосинтеза. Материал спиц – нер-

жавеющая сталь 12Х18Н10Т, поверхность без дополнительной обработки, т. е. после производства.

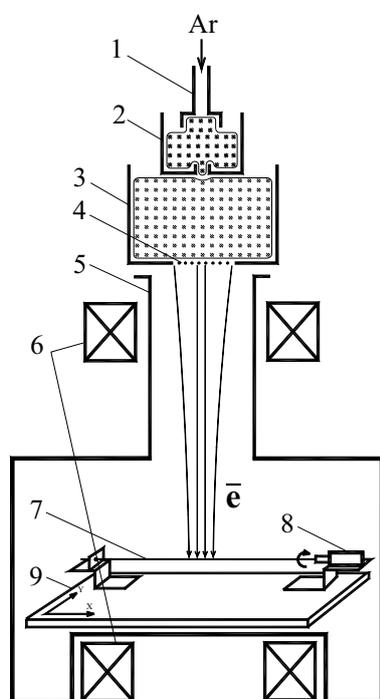
Полировка поверхности спиц для снижения травмирующего воздействия на костные структуры проводилась с помощью плотного импульсного электронного пучка субмиллисекундной длительности. Генерация импульсного электронного пучка осуществлялась с помощью электронного источника с плазменным катодом, входящего в состав вакуумной электронно-пучковой установки «СОЛО» [6] (рис. 1). Установка состоит из: вакуумной камеры; системы вакуумной откачки; электронного источника; системы питания электронного источника; двухкоординатного манипулятора; системы автоматизации и управления установкой. Общее управление вакуумной системой, параметрами генерации пучка и манипулятором осуществляется с помощью компьютера. Диапазон рабочих давлений электронного источника составляет  $1...5 \cdot 10^{-2}$  Па. Рабочий газ – аргон.

Электронный источник с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления позволяет генерировать электронный пучок длительностью 20...200 мкс, током пучка до 300 А, энергией электронов до 25 кэВ, частотой следования импульсов 0,3...20 Гц, скважность 250...1,6·10<sup>5</sup> и плотностью энергии до 100 Дж/см<sup>2</sup>. При воздействии импульсного электронного пучка микросекундной длительности на поверхность спицы происходит её сверхскоростной нагрев и плавление, а затем быстрое охлаждение за счёт

распространения тепла вглубь и по длине спицы. В результате на поверхности образуется расплавленный слой толщиной до 20 мкм, который вследствие сил поверхностного натяжения выглаживает поверхность до зеркального блеска. Кроме полировки поверхности может происходить модификация поверхностного слоя, которая заключается в повышении микротвёрдости, коррозионной стойкости, износостойкости и др. В зависимости от поставленной задачи подбором параметров генерации пучка можно определить режимы, в которых эти эксплуатационные характеристики будут улучшаться.

Как следует из схемы эксперимента (рис. 1), для однородной электронно-пучковой полировки поверхности спицы аппарата чрескостного остеосинтеза в вакуумную камеру был установлен электродвигатель, вращающий спицу в процессе обработки.

Откачка вакуумной камеры до рабочего давления ( $3,5 \cdot 10^{-2}$  Па) занимала 20 мин. Сканирование электронным пучком по длине спицы обеспечивалось за счёт перемещения манипулятора по одной из его координат. Полировка спицы осуществлялась за три прохода с частотой следования импульсов 1 Гц. Длительность импульсов и плотность энергии пучка за один импульс составляла 50 мкс и 15 Дж/см<sup>2</sup> соответственно. Процесс обработки одной спицы занимал 3,5 мин. Результат полировки поверхности спиц представлен на рис. 2. Изначально на поверхности спицы видны продольные



**Рис. 1.** Схема эксперимента и внешний вид установки «СОЛО». 1) полый анод поджигающего разряда; 2) полый катод; 3) полый анод основного разряда; 4) эмиссионная сетка; 5) труба дрейфа; 6) катушки магнитного поля; 7) обрабатываемая спица; 8) электродвигатель, вращающий спицу; 9) двухкоординатный манипулятор

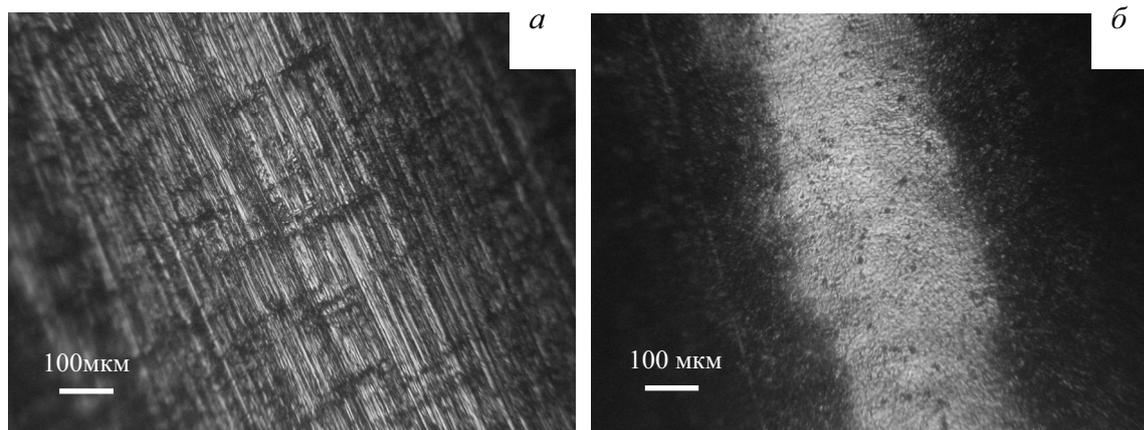


Рис. 2. Фотографии поверхности спицы до (а) и после (б) электронно-пучковой полировки, сделанные с помощью оптического микроскопа

царапины, образовавшиеся в результате проката. После облучения поверхности спицы электронным пучком происходит выглаживание и затекание царапин, шероховатость поверхности уменьшается в  $\sim 10$  раз и достигает  $Ra=0,03$  мкм.

После электронно-пучковой полировки поверхности для снижения нагрева спицы при проведении через костную ткань осуществлялась её заточка. В отличие от традиционной трёхгранной или перьевой заточки было предложено использовать заточку в виде сверла (рис. 3). Заточка производилась вручную на абразивно-шлифовальном станке с использованием алмазного круга толщиной не более 2 мм [7]. В дальнейшем планируется автоматизировать этот процесс.

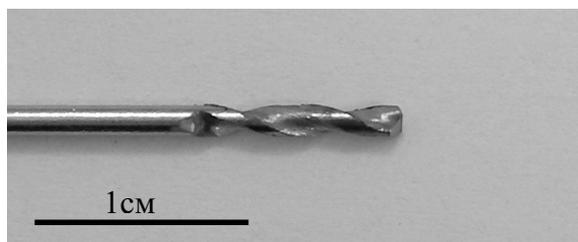


Рис. 3. Внешний вид конца спицы, заточенного в форме сверла

Испытания спиц проводились в острых и хронических опытах.

Исследование выполнено в соответствии с «Европейской конвенцией по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей», согласно «Правилам проведения работ с использованием экспериментальных животных» (приказ МЗ СССР № 755 от 12.08.1987 г.) и с Федеральным законом о защите животных от жестокого обращения от 01.01.1997 г., а также Директивой 86/609 ЕЭС, основанной на тексте соглашения «Dr. Robert Hubrecht, Current EU Legislation Controlling Animal Experiments».

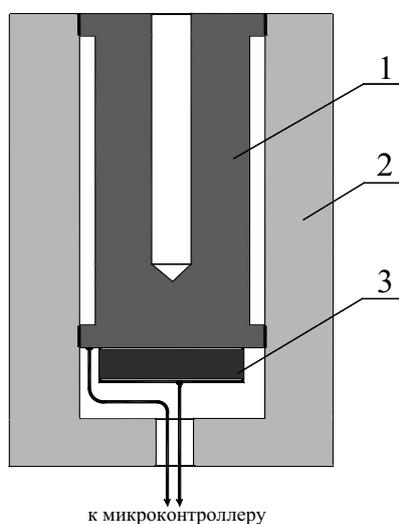
Острые опыты. После полировки и заточки проводилось изучение особенностей проведения спиц

на нативном материале (симметричные большеберцовые кости крупного рогатого скота) с использованием автоматической пистолетной дрели со скоростью вращения 1200 об/мин. Измерялась температура острия спицы до и после сверления, фиксировалось время прохождения спицы через кость. Эти данные сравнивались с аналогичными для необработанных спиц с трёхгранной заточкой. Измерения температуры сначала проводились с помощью радиационного термометра «Raytek ST80». Паспортная погрешность измерения прибора составляет  $\pm 2$  °С.

Принцип действия прибора основан на измерении энергетической яркости части инфракрасного излучения, прошедшего через оптическую систему радиационного термометра и поглощённого его приёмником излучения, и определении температуры по измеренному значению. Однако в процессе измерения температуры спицы выяснилось, что в нашем случае показания прибора были некорректны. Во-первых, минимальный диаметр поверхности, с которой прибор регистрирует излучение, равен 19 мм и кроме излучения спицы прибор в большей степени измерял температуру окружающей среды. Во-вторых, неизвестен коэффициент излучения для нержавеющей стали, из которой изготовлены спицы. Его можно определить только способом подбора с использованием контактного метода измерения температуры, который для нас также не применим из-за быстрого остывания спицы.

В результате был предложен метод качественного измерения температуры с помощью специально изготовленного калориметра (рис. 4). Он состоял из медного цилиндра – 1  $\varnothing 5$  мм с глухим отверстием  $\varnothing 1,8$  мм, глубиной 8 мм и терморезистора – 3 (B57350K102J фирмы EPCOS), припаянного с обратной стороны. Для теплоизоляции медный цилиндр и терморезистор были помещены во фторопластовый держатель – 2. Принцип измерения температуры заключался в нагреве медного цилиндра и терморезистора при тепловом контакте с заточенным концом спицы до и непосредственно после её

прохождения через костную ткань. Потери тепла на нагрев фторопластового держателя, сигнальных проводов, излучение и другие – считались постоянными и не учитывались. Сигнал с терморезистора обрабатывался микроконтроллером и выводится на экран компьютера в виде текущей температуры цилиндра. Погрешность измерения температуры таким способом составляла  $\pm 5\%$ . В этом случае все измеренные значения температур для спиц были относительными, так как происходил переход тепловой энергии от спицы к цилиндру, и отображаемая температура находилась между реальными значениями температур спицы до и после эксперимента. Применение данного метода оказалось более точным для определения влияния заточки и полировки на скорость прохождения и температуру спиц.



**Рис. 4.** Схема устройства калориметра для относительного измерения температуры спицы: 1) медный цилиндр с отверстием для спицы; 2) фторопластовый теплоизолятор; 3) терморезистор

Хронические опыты. Влияние полировки поверхности стабилизированных (натянутых) спиц в аппарате чрескостного остеосинтеза на костную структуру изучалось в экспериментах на 12-ти беспородных собаках возрастом от 3 до 5 лет с открытыми механическими переломами в средней трети голени. Под внутривенным наркозом 10% раствора тиопентала натрия из расчета 25 мг/кг массы тела выполняли венесекцию большой подкожной вены, устанавливали катетер, осуществляли интубацию трахеи. Наркоз поддерживали внутривенным введением кетамина гидрохлорида из расчета 1,0...1,2 мг/кг. На одной из кольцевых опор аппарата чрескостного остеосинтеза были закреплены спицы без полировки поверхности и с трёхгранной заточкой, на другой кольцевой опоре – спицы подвергнутые полировке по вышеуказанной методике и с заточкой в виде сверла. Морфологические исследования области спицевого канала изучались 15, 30 и 60-е сутки после операции.

Статистическая обработка результатов исследования осуществлялась с применением методов ста-

стистического анализа с помощью пакета прикладных программ «Statistica». Нормально распределяемые показатели приведены в их среднем значении со стандартным отклонением. Достоверность различий анализировали с помощью непараметрического критерия Фридмана, с расчётом коэффициента конкордации Кендала, при дисперсионном анализе повторных измерений. Для оценки достоверности различий несвязанных выборок применяли критерий Манна–Уитни.

#### Результаты и обсуждение

Проведение спиц с трёхгранной заточкой требовало значительных физических усилий, время их проведения составило  $34,1 \pm 5,12$  с, температура острия спицы в результате проведения через кость по данным инфракрасного пирометра повышалась на  $9,9 \pm 0,57$  °С, а по данным калориметра на  $27,6 \pm 0,05$  усл. ед. Время проведения спиц с заточкой в виде сверла составило  $11,3 \pm 1,19$  с, температура острия после проведения через кость по данным инфракрасного пирометра повышалась на  $3,9 \pm 0,12$  °С, а по данным калориметра на  $2,6 \pm 0,14$  усл. ед. Таким образом, заточка в виде сверла существенно облегчает чрескостное проведение спицы, а время проведения в среднем в три раза меньше, чем при использовании спиц с традиционной трёхгранной заточкой. Значительное снижение нагрева в спице с заточкой в виде сверла при чрескостном проведении по сравнению с трёхгранной заточкой является существенным условием в профилактике спицевого остеомиелита.

Из 24-х проведённых и закреплённых спиц с трёхгранной заточкой спицевой остеомиелит в срок 18...26 сутки после операции развился в 4-х случаях. Из 24-х спиц подвергнутых полировке поверхности и с заточкой в виде сверла случаев (воспаления) спицевого остеомиелита не было. Морфологические исследования области спицевого канала образованного проведением спиц  $\varnothing 1,5$  мм с трёхгранной заточкой в установленные сроки выявили значительное увеличение диаметра ( $1,8 \pm 0,35$  мм) последнего по сравнению с проводимой спицей во все сроки наблюдения, кроме того, наличие некроза по всему периметру канала на глубину  $0,3 \pm 0,75$  мм с расширением к выходному отверстию. Несомненно, это отрицательно отражалось на качестве иммобилизации. При проведении спиц с заточкой в виде сверла диаметр спицевого канала ( $1,6 \pm 0,05$  мм) в меньшей степени превышал диаметр проведённой спицы, а некроз по периметру канала распространялся при проведении данных спиц на глубину  $0,1 \pm 0,05$  мм с равномерным распределением по длине канала. Таким образом, уменьшение диаметра спицевого канала, отсутствие воспалительных явлений (спицевой остеомиелит) и протязённости посттравматического некроза при использовании спиц с заточкой в виде сверла является залогом качества создаваемой иммобилизации в системе «аппарат чрескостного остеосинтеза – конечность» и профилактики спицевого остеомиелита.

### Выводы

1. Полировка поверхности спиц аппарата чрескостного остеосинтеза с помощью импульсного электронного пучка субмиллисекундной длительности обеспечивает достоверное снижение травмирующего воздействия спиц на костные структуры на протяжении иммобилизации, что является условием профилактики спицевого остеомиелита.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли А.Д., Баширов Р.С. Руководство по чрескостному компрессионно-дистракционному остеосинтезу. – Томск: Изд-во «Красное Знамя», 2002. – 307 с.
2. Соломин Л.Н. Основы чрескостного остеосинтеза аппаратом Г.А. Илизарова. – СПб.: ООО «МОРСАР АВ», 2005. – 544 с.
3. Ilizarov G.A. Transosseous Osteosynthesis: Theoretical and Clinical Aspects of the Regeneration and Growth of Tissue. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. – 800 p.
4. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devjatkov V.N., Sochugov N.S., et al. Automated power complex for pulse surface treatment of materials by electron beam // Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2006. – P. 79–85.

2. Применение спиц с заточкой в виде сверла по сравнению с традиционной трёхгранной формой обеспечивает быстрое их проведение через кости, существенное снижение нагрева и обеспечивает оптимальную конгруэнтность спицевого канала и самой спицы, что является залогом качества иммобилизации и профилактики гнойных хирургических осложнений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 08–08–92207 и № 09–02–90456.*

5. Ivanov Yu.F., Kolubaeva Yu.A., Teresov A.D., Koval N.N., et al. Electron beam nanostructuring of titanium alloys surface // Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2008. – P. 143–146.
6. Grigoriev S.V., Devjatkov V.N., Koval N.N., Teresov A.D. The Automated installation for surface modification of metal and ceramic-metal materials and products by intensive pulse sub-millisecond electron beam // Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2008. – P. 19–22.
7. Спица для остеосинтеза: пат. на ПМ 59394 Рос. Федерация. № 2006128758/22; заявл. 07.08.2006; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36. – 3 с.

*Поступила 06.09.2010 г.*

УДК 621.793.7

## РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ, СОЗДАВАЕМОГО УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ НАПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА

Ж.Г. Ковалевская, А.П. Жуков\*, В.А. Клименов, В.Г. Бутов, К.В. Зайцев\*\*

Томский политехнический университет

\*НИИ прикладной механики и математики Томского государственного университета

\*\*Юргинский технологический институт ТПУ

E-mail: kovalevskaia@ispms.tsc.ru

*Численно рассмотрен процесс затвердевания газотермически напыленного материала на подложке из стали. Учтено изменение микрорельефа поверхности, создаваемое ультразвуковой обработкой. Использовалось решение нестационарного уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода расплав – твердый материал. Для численного решения применялся метод конечных элементов. Получены зависимости термического цикла температуры и скорости охлаждения от времени. Показано, что условия охлаждения напыляемого материала зависят от высоты и частоты расположения микронеровностей.*

### Ключевые слова:

*Газотермическое напыление, ультразвуковая финишная обработка, микрорельеф поверхности, метод конечных элементов, термические циклы.*

### Key words:

*Gas-thermal spraying, ultrasonic finishing treatment, surface microrelief, method of final elements, thermal cycle.*

### Введение

Создание современных технологий газотермического напыления, характеризующихся высокими и сверхвысокими скоростями осаждения напыляемого материала на основу, меняет условия подготовки поверхности перед напылением. Первым показателем качества поверхности становится концентрация дефектов кристаллического строения поверхностного слоя детали [1–3].

Одним из передовых способов подготовки поверхности детали, обеспечивающих максимальную активацию поверхности, является ультразвуковая финишная обработка поверхности (УФО). В процессе УФО за счет множественного воздействия ударного инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой, поверхность детали пластически деформируется, модифицируя структуру поверхностного слоя на глубину до 400 мкм. Повышение