

The analysis of the applied at present time types of grindings and the new ones, developed on the basis of study of the mechanical characteristics and peculiarities of the bone material is carried out. The estimation of separate types of spokes grinding with relation to efficiency of cutting and technology of their fulfillment is carried out.

Ю. Г. АЛЕКСЕЕВ, В. Н. СТРАХ, А. Ю. КОРОЛЕВ, УП «Технопарк БНТУ «Метолит»

УДК 621.74

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ, ОСНОВАННАЯ НА ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДАХ

Анализ условий работы и требования к геометрии и материалу спиц

Сверление материала кости спицей для скелетного вытяжения относится к глубокому сверлению, когда глубина отверстия свыше $5D$ [1]. При обработке таких отверстий условия работы спицы как режущего инструмента резко ухудшаются, так как затрудняется отвод стружки и теплоты из зоны резания, уменьшается жесткость спицы, требуются специфические режимы резания. При таком сверлении спица прорезает сначала прочный кортикальный слой (120–150 МПа) толщиной 5–7 мм, затем пористый спонгиозный слой и на выходе – снова кортикальный слой. Глубина сверления при этом может составлять до 50 мм при диаметре спицы до 2 мм.

Согласно [2], спицы имеют определенную длину, диаметр, форму и заточку. Предел прочности материала спиц должен составлять 1350–1500 МПа. Спицы изготавливают из аустенитной стали 12Х18Н10Т или ее заменителей по ГОСТ 5632-72.

Конструкция спицы должна обеспечивать требуемое качество получаемых отверстий. Основными дефектами, образующимися в результате сверления глубоких отверстий, являются [3]:

- собственно уводы оси отверстий на торцах кости или в данном сечении;
- кривизна оси отверстия в сечениях кости;
- конусность отверстий;
- бочкообразность отверстий.

Возникновение погрешностей обусловлено двумя группами причин. Первая связана с качеством самого инструмента, куда можно отнести его конструкцию, вид и качество заточки, жесткость и т.п. Анализ причин первой группы позволяет сделать вывод о том, что для улучшения качества проводимых глубоких отверстий

в кости при остеосинтезе желательно применять спицу с определенным базированием, максимально возможной жесткостью, имеющей несколько режущих кромок (деление подачи на зуб) и обеспечивающей хороший отвод стружки из зоны резания.

Вторую группу составляют технологические параметры. К ним в первую очередь можно отнести неудачно выбранные режимы резания при сверлении; неправильное направление инструмента в начале сверления; несоответствие применяемого оборудования для сверления; неоднородность материала как в продольном, так и поперечном направлении.

Очевидно, что на погрешности получаемых отверстий практически нельзя исключить влияние неоднородностей механических характеристик кости как в продольном, так и в поперечном сечении. Неправильное направление спицы-сверла будет определяться характером и местом перелома, а также квалификацией хирурга. Однако основное влияние на качество получаемых отверстий будут оказывать выбор оптимального вида, геометрии и качества заточки и соответствие этой заточке режимов резания и применяемого оборудования. К режимам резания в данном случае можно отнести осевое усилие подачи на инструмент; величину подачи; скорость резания.

Очевидно, что осевое усилие подачи и сама величина подачи взаимосвязаны, т.е. с увеличением подачи будет возрастать осевое усилие на спицу. При достижении какого-то значения это усилие приведет к изгибу спицы, что не допустимо. Изгиб вызовет дополнительный увод проходимого отверстия от намеченного направления и конусность отверстия. Причем диаметр отверстия в данном сечении будет равен:

$$D = d + 2f,$$

где d – диаметр спицы; f – стрела прогиба спицы в данном сечении.

Кроме того, у отверстия могут появиться бочкообразность из-за непостоянства осевой силы, обусловленной неоднородностью кости, и подгорание кости за счет трения цилиндрической поверхности спицы по поверхности уже пройденной части отверстия. Превышение скорости резания сверх допустимой также приведет к подгоранию кости особенно при плохих условиях отвода стружки. Предварительные исследования показали, что допустимая осевая нагрузка на спицу не должна превышать 15–20 Н при вылете спицы из зажимного патрона 200 мм, а скорость резания должна находиться в пределах 4–6 м/мин.

Используя эмпирическую формулу

$$P_{oc} = 10C_p D^q S^y K_p,$$

где C_p – предел прочности кости, МПа; D – диаметр спицы, мм; S – скорость подачи, м/с; q, y – эмпирические коэффициенты; K_p – коэффициент коррекции, была определена скорость подачи, которая находится в пределах $S=0,75-1,0$ мм/с, при скорости резания $V=4,3-6,1$ м/мин.

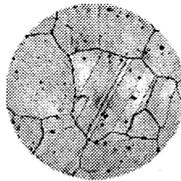
Разработка и исследование метода деформационного упрочнения заготовки для спиц волочением

Стали аустенитного класса термически не упрочняются. Поэтому для получения исходной заготовки с высокими механическими характеристиками при изготовлении спиц применили волочение. Обычно его проводят при комнатной температуре, когда пластическую деформацию сопровождает наклеп. Это свойство используют для повышения прочностных характеристик материала. Так, при обжати волочением происходит значительное изменение свойств материала: возрастают предел текучести и предел прочности, уменьшается величина относительного удлинения и относительного сужения, увеличивается усталостная прочность, повышается удельное электрическое сопротивление, снижается коррозионная стойкость.

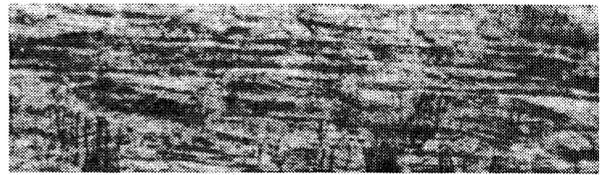
Предел прочности возрастает в 2,0–2,5 раза при исходном значении 590 МПа. Это связано с ориентацией зерна вдоль линий скольжения и затруднением движения дислокаций на границах зерен в структурных неоднородностях и несовершенствах. Структурный анализ, выполненный на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (рис. 1), также показал, что с ростом степени деформации в структуре стали повышается содержание мартенсита. Высоколегированная сталь аустенитного класса 12X18H10T является неустойчивым в структурном отношении сплавом. Неустойчивость структуры главным образом определяется фазовыми превращениями, происходящими при

пластической деформации, в результате которой аустенит закаленного сплава превращается в мартенсит. При этом структура деформированного аустенита наследуется образующимся мартенситом.

Мартенситное превращение в процессе пластической деформации протекает с образованием промежуточной фазы ϵ -мартенсита, имеющего гексагональную плотноупакованную решетку. Происходит оно бездиффузионным сдвиговым путем с большой скоростью при ограниченном росте кристаллов. Вначале образуются дефекты упаковки, а когда их концентрация достигает критической величины, начинается мартенсит-



а



б

Рис. 1. Микроструктура стали 12X18H10T: а – до волочения; б – после волочения (степень обжатия 44%). $\times 200$

ное превращение [4]. Гексагональная ϵ -фаза сохраняется при сравнительно малых степенях деформации. При более высоких степенях она непрерывно превращается в мартенсит. Активирующее влияние пластической деформации на $\gamma \Rightarrow \alpha$ -превращение зависит от химического состава, способа, температуры, степени и скорости деформирования. Пластическая деформация данной стали может также вызывать различную степень субструктурных изменений: образование расщепленных дислокаций с дефектами упаковки различной плотности, процесс блокирования дислокаций примесными атомами и образование выделений.

Для обеспечения заданных механических характеристик спиц разработаны режимы деформационного упрочнения коррозионностойкой стали 12X18H9T. Исходным материалом являлась горячекатаная заготовка диаметром 4,5 мм. Заготовка подвергалась многократному волочению без промежуточной разупрочняющей термообработки до конечного диаметра 2 мм (суммарная степень обжатия – 80%). Для этого было выполнено восемь проходов волочения, а средний коэффициент вытяжки за проход составил 1,23.

На рис. 2 показана установленная экспериментально-расчетным методом диаграмма деформационного упрочнения в процессе волочения.

Как показывают данные исследований, эта зависимость носит характер, близкий к линейному. В результате волочения с суммарной степенью обжатия 80 % предел прочности материала составил 1450 МПа (исходный – 590 МПа), что соответствует требуемому пределу прочности спиц.

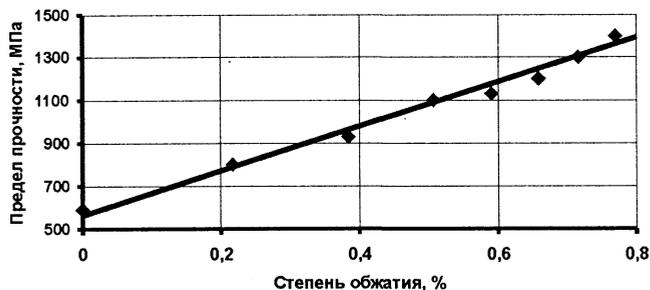


Рис. 2. Зависимость предела прочности от степени обжатия стали 12X18H9T

Выбор геометрии заточки и исследование сил резания спиц

При прочих равных характеристиках спиц основное влияние на их качество как режущего инструмента будут оказывать вид, геометрия и качество заточки. Поэтому разработка конструкции свелась к выбору оптимального вида заточки, который должен обеспечить минимальное осевое усилие резания для предотвращения изгиба спицы при определенных режимах (подаче и скорости резания).

Для исследований были выбраны пять видов заточки (рис. 3). Два первых вида заточки, выполненных на спицах, производились Оршанским инструментальным заводом.

Трехгранная заточка (рис. 3, а) является спицей без определенного базирования с делением подачи на зуб, т.е. $S_{zi} = S_0/3$.

Перовая заточка (рис. 3, б) представляет собой спицу с определенным базированием и имеет одну режущую кромку без заднего угла.

Спицы, показанные на рис. 3, в, самые простые по конструкции. Угол 2ϕ такой же, как у спиральных сверл. Такие спицы являются спицами без определенного базирования с делением подачи на зуб. Они имеют две режущие кромки с задними углами $S_{zi} = S_0/2$.

Ружейная заточка у спицы (рис. 3, г) обеспечивает получение точных отверстий с прямой осью и большой глубиной. В процессе работы спица испытывает сложные деформации: кручение, сжатие и продольный изгиб. Вершина спицы смещена влево относительно оси на величину $0,2D$. За счет этого при работе спицы образуется кольцевая канавка, центрирующая спицу в отверстии.

Использованный метод определения осевого усилия подачи основан на измерении степени упругой деформации заранее проградуированной пружины.

Для каждого типа заточек были предложены по четыре варианта геометрии. На рис. 4 приведены зависимости осевого усилия резания от геометрии инструмента для каждого вида заточки, а на рис. 5 – сравнительная диаграмма осевого усилия резания спицами с заточками различных видов.

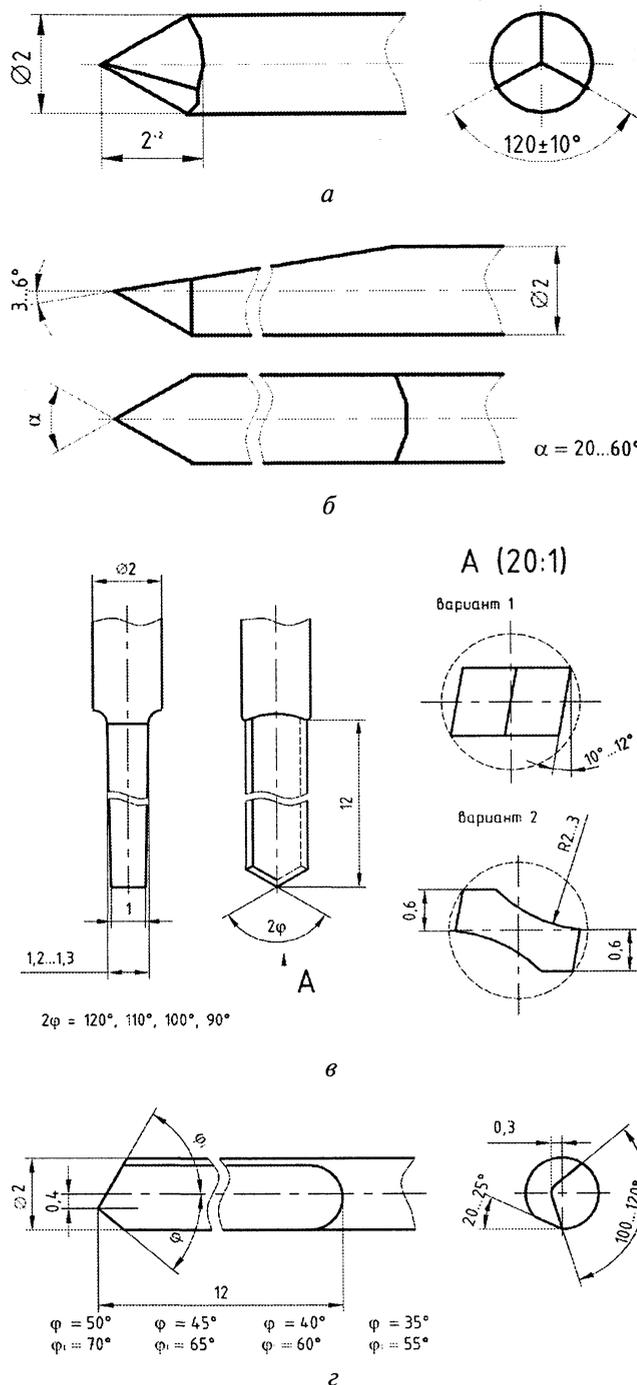


Рис. 3. Варианты заточки спиц: а – трехгранная заточка; б – перовая заточка; в – перовая спица; г – ружейная заточка у спицы

Зависимость усилия резания от геометрии режущего инструмента для трехгранной заточки (рис. 4, б) и перовой спицы по варианту 1 (рис. 4, в) представляет собой параболу с характерными минимумами значений усилий резания.

С увеличением углов профиля в исследуемом диапазоне значений происходит снижение усилия резания для перовой спицы по варианту 2 (рис. 4, г) и перовой заточки (рис. 4, а). В первом случае резкое снижение усилия резания наблюдается при значении угла заточки выше 110° . Во

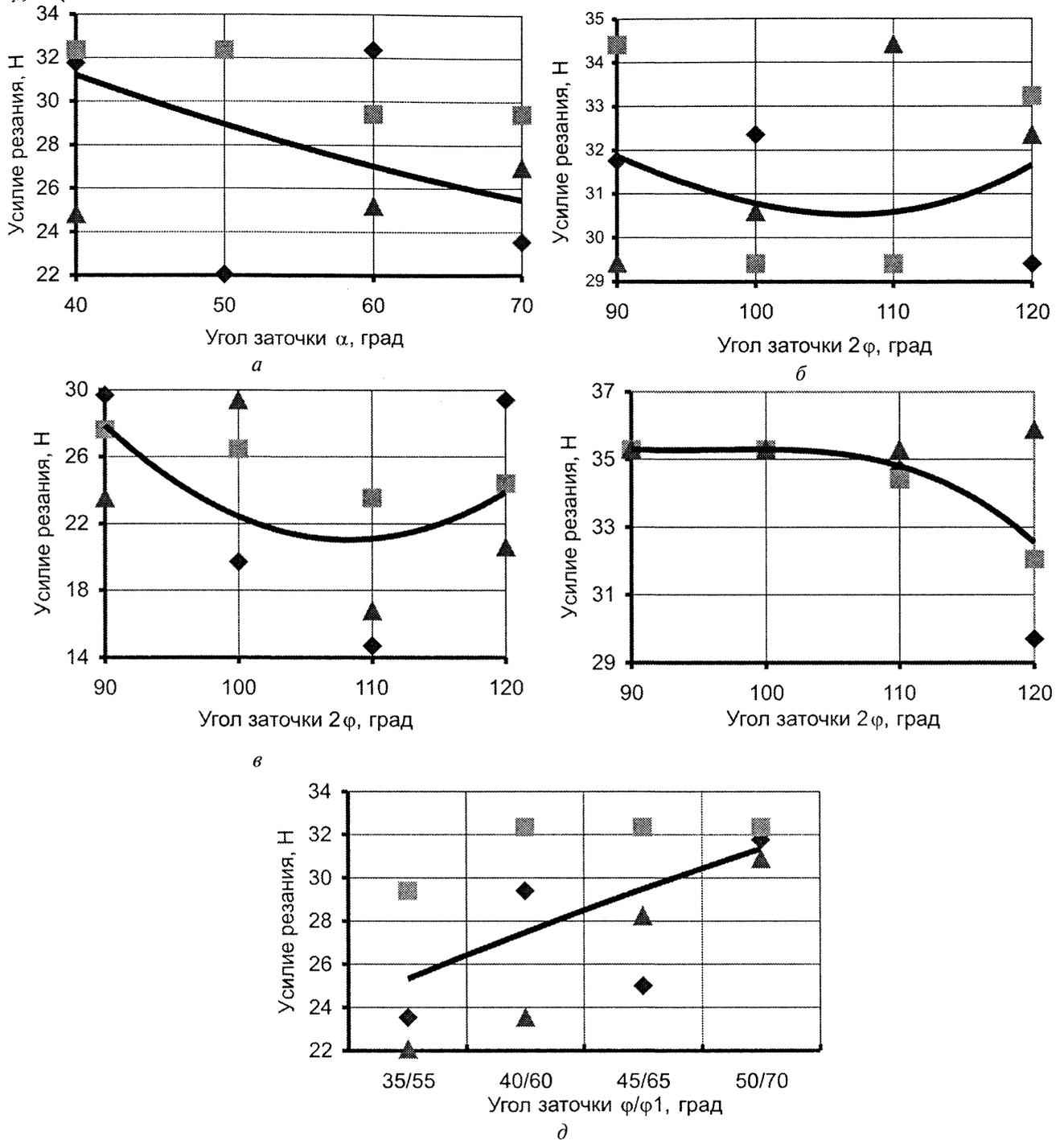


Рис. 4. Зависимость усилия резания от геометрии спицы: а – спица с первой заточкой; б – спица с трехгранной заточкой; в – перовая спица с заточкой по варианту 1; г – перовая спица с заточкой по варианту 2; д – спица с ружейной заточкой

втором случае характер зависимости линейный. Для ружейной заточки наблюдается линейный рост усилия резания при увеличении суммарного угла заточки (рис. 4, д).

Из сравнительного анализа усилий резания (рис. 5) следует, что наилучшими режущими свойствами обладают перовые спицы с заточкой по варианту 1 (см. рис. 3, в), углом в плане $2\phi=110^\circ$, которые обеспечивают сверление наибо-

лее качественного отверстия, более удовлетворительный отвод стружки и минимальное усилие резания.

Максимальное усилие резания наблюдается у перовой спицы с заточкой по варианту 2 с углом 100° (см. рис. 3, г). Значительное увеличение усилия резания перовой спицей, изготовленной по варианту 2 (по сравнению с вариантом 1), объясняется прежде всего ограниченными возможностями



Рис. 5. Сравнительная диаграмма осевого усилия резания спицами с заточками различных видов: I – перовая заточка; II – перовая спица (вариант 1); III – перовая спица (вариант 2); IV – ружейная заточка; V – трехгранная заточка

изготовления режущих кромок на спице диаметром 2 мм. Получение заднего угла на перемычке шириной 0,5–0,6 мм является технологически сложной задачей, так как при заточке такой перемычки режущая кромка может закругляться. Увеличение усилия резания также обусловлено затрудненным отводом стружки из зоны резания по канавкам радиусом 2–3 мм.

При резании спицей с трехгранной заточкой (см. рис. 3, б) снижается подача и соответственно усилие, действующее на режущую кромку. При этом достигается меньший, чем при резании спицами с двумя кромками, размер стружки. Однако при этом стружка удаляется из зоны резания «на проход», что приводит к горению кости и значительному увеличению усилия резания.

Спица с ружейной заточкой имеет определенность базирования и деление ширины реза. Однако отвод стружки из зоны резания затруднен по канавке с углом 100–120°, что приводит к росту усилия резания (см. рис. 4, д).

Достаточно высокое усилие резания спицей с перовой заточкой (см. рис. 4, а) объясняется наличием одной режущей кромки. У такой спицы отвод стружки из зоны резания также затруднен. При отсутствии заднего угла режущей кромки растут силы трения и, как следствие, увеличивается тепловыделение.

Следует отметить высокую технологичность перовой спицы с заточкой по варианту I. Режущие свойства таких спиц можно улучшить, удвоив длину пера до 15–18 мм и уменьшив его толщину до 0,9–1,0 мм при соблюдении указанных режимов резания. Однако при этом возникает вероятность того, что при значительном превы-

шении усилия подачи может происходить скручивание пера.

При сверлении спицами необходимо пользоваться дрелями, позволяющими пропускать спицу по оси шпинделя дрели и обеспечивать ее вылет на величину не более 100 мм. При отсутствии такого инструмента можно использовать обычные дрели с оборудованием их специальной откидной приставкой с направляющей втулкой, что также обеспечит требуемый вылет спицы и ее жесткость.

При сверлении кости спицами меньшего диаметра необходимо уменьшать подачу спицы на оборот (S_0) и пропорционально увеличивать ее частоту вращения, что позволит, с одной стороны, снижать усилие подачи при уменьшении жесткости спиц, а, с другой – поддерживать необходимую скорость резания.

Электролитно-плазменная обработка поверхности спиц

Спицы относятся к погружным травматологическим металлоконструкциям. Поэтому к качеству поверхности спиц предъявляют жесткие требования. Параметр шероховатости поверхности R_a таких изделий не должен превышать 0,63 мкм.

Волочение материала сопровождается образованием на его поверхности задиры и микротрещин, а также дефектного слоя глубиной 30–50 мкм с повышенным содержанием дислокаций. Эти дефекты являются причинами различного вида коррозии.

Для удаления дефектного слоя и повышения качества поверхности при изготовлении спиц применили электролитно-плазменную обработку (ЭПО). На рис. 6 показаны микроструктуры поверхностных слоев деформированных прутков до и после ЭПО.

ЭПО является высокопроизводительным методом снижения шероховатости, очистки, подготовки под покрытия поверхностей изделий сложной формы [5]. Это экологически чистый и безвредный процесс, протекающий с использованием электролитов с низкой концентрацией солей. ЭПО подвергали готовые спицы после волочения и выполнения заточки в 5%-ном водном растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,



Микротрещины

Задиры

После ЭПО

Рис. 6. Структура поверхности деформированного материала до и после ЭПО. $\times 200$

плотность тока составляла 0,2–0,3 А/см², температура электролита находилась в пределах 75–85°С. Экспериментально было установлено, что при этих режимах скорость съема стали составляла примерно 5 мкм/мин. Съем материала – 25–50 мкм.

На базе НИЛ «Физика поверхности и тонких пленок» БелГУТ были проведены исследования образцов коррозионностойкой стали 12Х18Н9Т, полированных пастой ГОИ и образцов, обработанных ЭПО. При исследованиях снимали анодные поляризационные кривые в потенциодинамическом режиме при скорости изменения потенциала 1 мВ/с. Все измерения проводили в 0,9%-ном растворе натрия хлористого (физиологический раствор). Из рис. 7 видно, что при ЭПО по сравнению с полированием пастой ГОИ антикоррозионные свойства значительно выше. Повышение антикоррозионных характеристик связано с тем, что при механических методах обработки поверхностный слой материала дополнительно наклепывается и шаржируется частицами абразивного инструмента или полировочных паст с образованием поверхностных дефектов, а при

ЭПО происходит снятие материала без внесения дополнительных дефектов.

Кроме того, при ЭПО происходит снижение количества карбидных и карбонитридных включений. На рис. 8 показаны фотографии поверхностей образцов, полированных пастой ГОИ и полированных ЭПО.

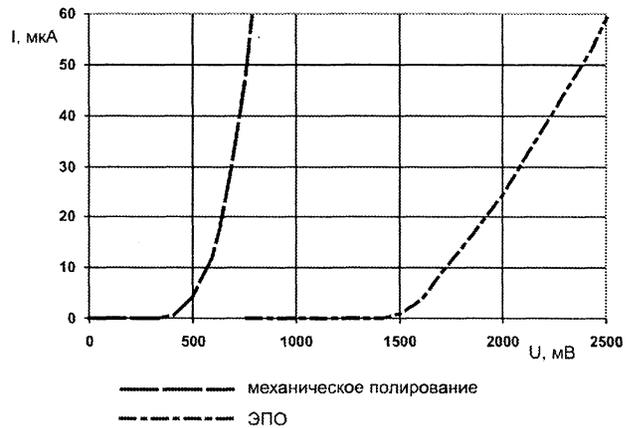
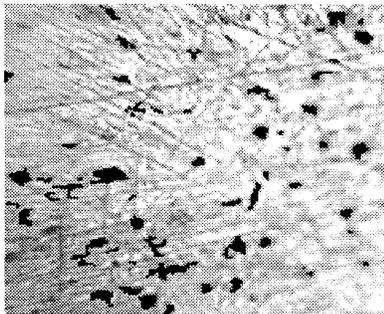
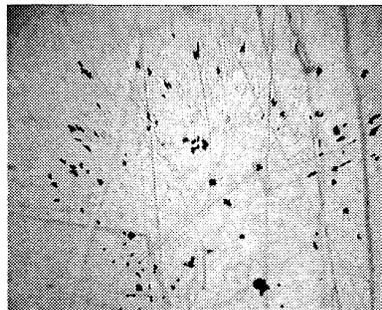


Рис. 7. Анодные поляризационные кривые



а



б

Рис. 8. Поверхность образцов из стали 12Х18Н9Т: а – механическое полирование; б – ЭПО. х200

Карбиды и карбонитриды при механической полировке занимают 2,52% от всей площади образца. При ЭПО карбидов и карбонитридов заметно меньше и они составляют 0,76% от общей площади.

На микротвердомере «Micromet-II» была замерена микротвердость тонкого поверхностного слоя материала до и после ЭПО. Установлено падение микротвердости примерно на 1 ГПа (с 4,25 до 3,13 ГПа), что объясняется снятием в результате ЭПО дефектного слоя материала прутка. Падение микротвердости можно также объяснить локальным термическим воздействием на тонкий поверхностный слой при ЭПО и снижением количества твердой фазы: карбидов и карбонитридов на поверхности стали в результате избирательного «травления» при ЭПО.

Кроме того, исследования шероховатости поверхности, проведенные совместно со специалистами из БелГУТ на АСМ «Нанотоп», показали,

что после ЭПО по сравнению с механическим полированием профиль поверхности более сглажен (рис. 9, 10).

Таким образом, ЭПО может заменить целый ряд предварительных и окончательных операций при финишной обработке поверхности спиц: механических – шлифовку, полировку; химических – травление, удаление смазки растворением, обезжиривание.

Кроме того, проведенные исследования показали возможность применения ЭПО между проходами при волочении с целью уменьшения числа проходов, снижения напряжения волочения, повышения ресурса работы инструмента, уменьшения обрывности материала; улучшения физико-механических характеристик материала. Этому способствуют снижение предела текучести материала после ЭПО и коэффициента контактного трения в очаге деформации.

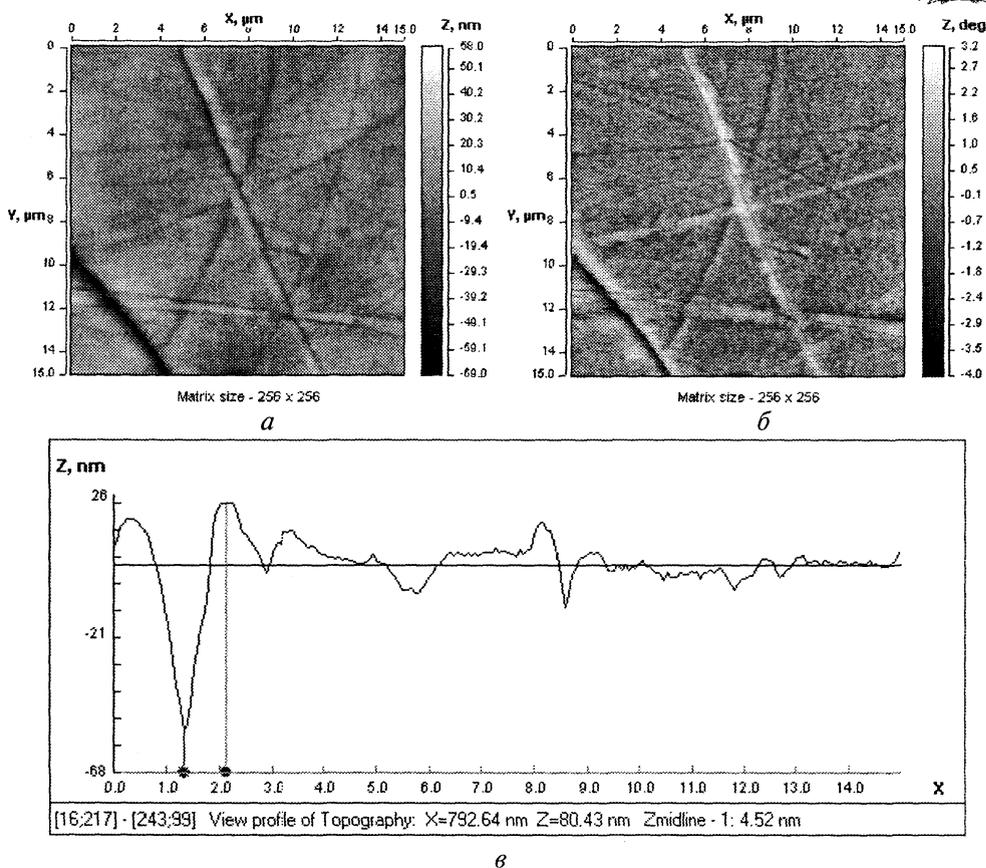


Рис. 9. ACM изображение стали 12X18H9T после ЭПО: а – топографический контраст; б – фазовый контраст; в – профиль поверхности по отмеченной линии

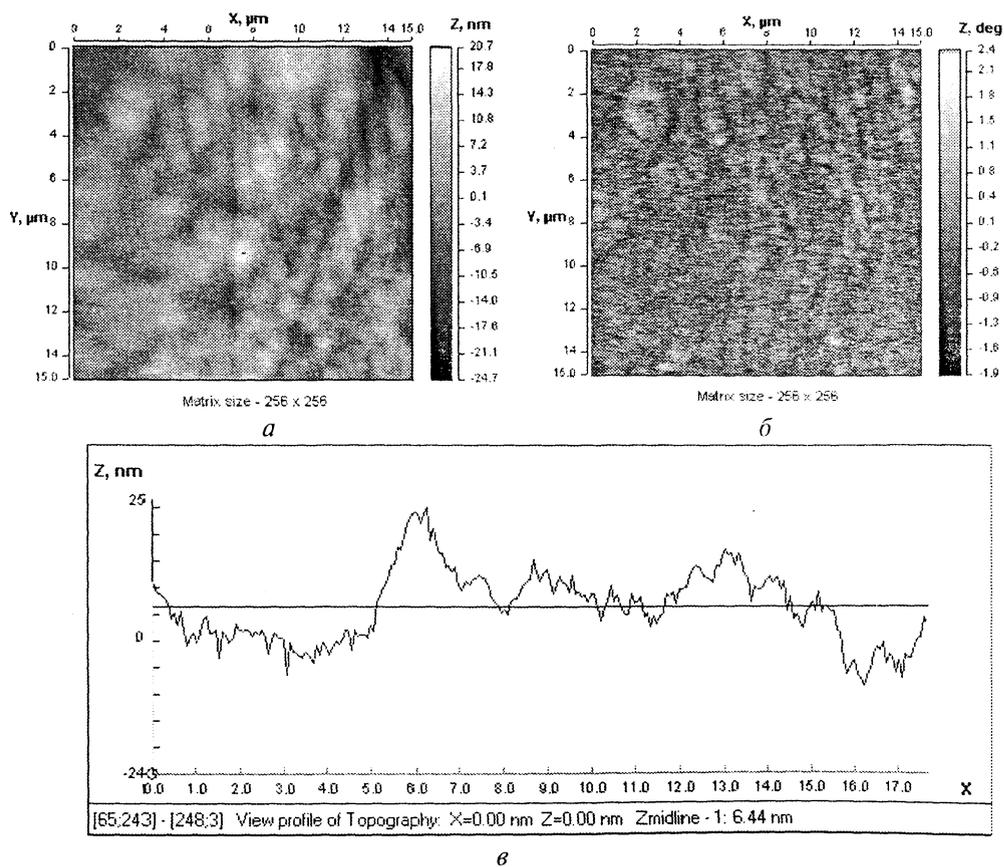


Рис. 10. ACM изображение стали 12X18H9T после полирования пастой ГОИ: а – топографический контраст; б – фазовый контраст; в – профиль поверхности по отмеченной линии

Снижение предела текучести материала в процессе ЭПО связано с локальным термическим разупрочнением тонкого поверхностного слоя материала и вытравливанием с поверхности твердой карбидной фазы, а снижение коэффициента трения – с повышением качества поверхности при обработке.

Заключение

Проведены комплексные исследования процесса изготовления спиц для остеосинтеза, включающего деформационное упрочнение заготовки, выполнение заточки и проведение финишной обработки.

Разработана методика деформационного упрочнения, позволяющая получать особонагартованный пруток (заготовку) для изготовления спиц с высокими механическими характеристиками.

Проведены исследования по резанию костного материала спицами для остеосинтеза. Установлены режимы резания кости, обеспечивающие хороший теплоотвод из зоны резания, небольшое усилие резания и высокое качество просверленных отверстий. Анализ вариантов заточек спиц (трехгранная и перовая) показал высокую технологичность их изготовления. Однако режущие способности таких спиц невысоки. Среди предложенных нами конструкций заточек спиц следует выделить перовую заточку по варианту 1. Такая

заточка проста в изготовлении. Она обеспечивает небольшое усилие резания и очень хороший отвод стружки. Проведенные исследования стали обоснованием для внесения этих видов заточек в технические условия на изделия «Спицы для скелетного вытяжения» и организации их производства.

Применение технологии ЭПО позволило не только упростить процесс финишной обработки сложной поверхности спиц, но и добиться удаления дефектного слоя и вытравливания карбидов с поверхности, что привело к повышению коррозионной стойкости материала.

Проведенные исследования представляют собой единый комплекс работ, положенный в основу при разработке технологического процесса изготовления спиц для остеосинтеза с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Литература

1. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент. Мн., Выш. шк., 1975.
2. ТУ РБ 14576608.002-2000. Имплантаты для лечения ортопедо-травматологических больных.
3. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. М.: Машиностроение, 1971.
4. Ллевелин Д.Т., Мэррей Дж.Д. Холодная пластическая деформация нержавеющей стали // Высоколегированные стали. М.: Металлургия, 1969.
5. Способ электрохимической обработки: А.с. 1314729 СССР / В.К.Станишевский, А.Э.Паршутто, А.А.Кособуцкий.