

Математическое моделирование компоновок стержневых аппаратов внешней фиксации

И.В. Зедгенидзе

The mathematical modeling of the configurations of rod external fixators

I.V. Zedgenidze

ГУ НЦРВХ ВСНЦ СО РАМН (директор – член-корреспондент РАМН Е.Г. Григорьев)

Техническим результатом предлагаемых компоновок стержневых аппаратов является повышение жесткости фиксации отломков за счет проведения стержней в разных плоскостях и под разными углами, в то же время разброс показателей жесткости фиксации отломков в различных плоскостях говорит об эластичности фиксации отломков, что влияет на процесс консолидации перелома.

Ключевые слова: биомеханика, стержневые аппараты, внешняя фиксация, математическое моделирование.

The increase of fragmental fixation rigidity at the expense of rod insertion in different planes and at different angles is a technical result of the proposed configurations of rod fixators; at the same time scattering of the measurements of fragmental fixation rigidity in different planes points to the elasticity of fragmental fixation, that influences on the process of fracture consolidation.

Keywords: biomechanics, rod fixators, external fixation, mathematical modeling.

С помощью программного комплекса Nastran, расчетная часть которого базируется на методе конечных элементов (МКЭ), были выполнены исследования жесткости стержневых систем, предназначенных для фиксации костных отломков. Костный отломок моделировался трубчатым стержнем с наружным диаметром $D=20$ мм, внутренним диаметром $d=14$ мм и длиной 125 мм. Модуль Юнга для материала кости принимался $E_k=21000$ МПа. Стальные стержни имели $d=5$ мм, длину 70 мм и модуль Юнга $E_c=190000$ МПа. Закрепление стержней в костном отломке принималось абсолютно жестким, соединение стержней между собой также моделировалось с помощью жесткой заделки.

Целью исследования являлось определение оптимального пространственного расположения стержней, обеспечивающего минимальное смещение костного

отломка в месте перелома в результате силового воздействия. В качестве условной нагрузки рассматривались три силовых фактора, действующих в пространственной системе координат YXZ (ось X направлена по продольной оси костного отломка): усилия $F_y=1000$ Н, $F_x=1000$ Н, $F_z=1000$ Н.

Исследованы варианты компоновки подсистемы аппарата внешней фиксации, состоящие из трех стержней, при этом стержни введены перпендикулярно к оси отломка и взаимно развернуты вокруг оси отломка так, что два из трех стержней расположены в одной плоскости.

В ходе исследования рассматривались линейные смещения центра тяжести сечения костного отломка в месте перелома по осям Y , X , Z отдельно от каждого силового фактора. Нагрузка прикладывалась в месте перелома.

ОБЪЕМНАЯ ПОДСИСТЕМА В ДВУХ ПЛОСКОСТЯХ

Технические условия.

Все стержни проведены перпендикулярно оси отломка. Крайние стержни ($L1$ и $L2$) проведены в

одной плоскости, под углом γ к плоскости среднего стержня (R). Точка «А» – место перелома (рис. 1).

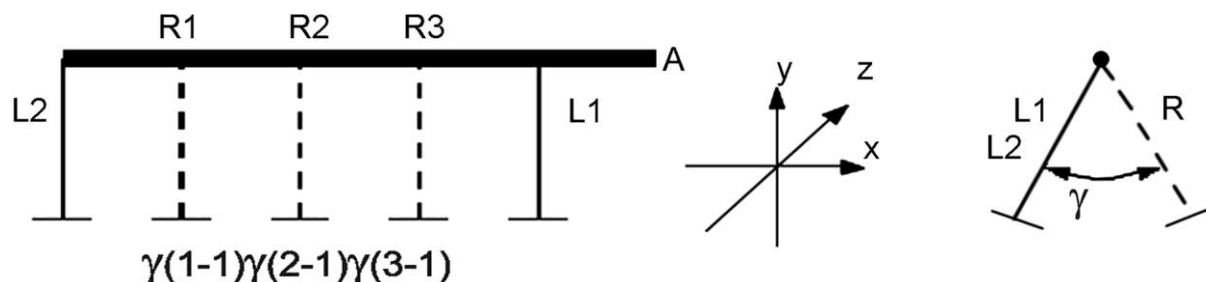


Рис. 1. Схема расположения и перемещения стержней, вариант компоновки 1

Рассмотрены три варианта поворота стержней (разведения плоскостей) вокруг оси отломка: $\gamma=30^\circ$, $\gamma=60^\circ$, $\gamma=90^\circ$.

Рассмотрены три варианта расположения среднего стержня – на $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ и $\frac{3}{4}$ расстояния между крайними стержнями, от дистального стержня (соотв. $\gamma(1-1)$, $\gamma(2-1)$, $\gamma(3-1)$).

Расчетные линейные деформации (в мм) при приложении нагрузки на место перелома (точка «А»), в зависимости от расположения среднего стержня и угла γ приведены в таблицах 1–3. Учитывая систему координат, начиная с 0 вправо – положительные результаты, влево – отрицательные.

При воздействии силы по оси X с изменением положения и плоскости среднего стержня отмечается увеличение линейных смещений по оси X от 1,75 мм в положении 30(2–1) до 1,83 в положении 90(х–1), колебания не превышают 0,08 мм (табл. 1).

При воздействии силы на место перелома по осям Y и Z с увеличением угла разведения плоскостей имеется тенденция к увеличению линейных смещений по оси X с 0,2 до 0,3 мм, при этом перемещение среднего стержня от периферии к месту перелома при каждом угле разведения увеличивает стабильность подсистемы.

При воздействии на место перелома силы по оси X при угле $\gamma=30^\circ$ и перемещении среднего стержня от периферии к месту перелома отмечается незначительное увеличение линейных смещений по оси Y с 0,14 до 0,16 мм. При увеличении угла поворота плоскостей ($\gamma=60^\circ$, 90°) отмечается тенденция к увеличению линейных смещений, но при этом перемещение среднего стержня от периферии к месту перелома приводит к снижению линейных смещений по оси Y (табл. 2).

При воздействии силы на место перелома по оси Y и Z имеется тенденция к увеличению линейных смещений по мере увеличения разведения плоскостей с четким уменьшением линейных смещений по мере приближения среднего стержня к месту перелома.

При воздействии на место перелома силы по оси X наименьшие смещения отмечаются при $\gamma=30^\circ$, независимо от вариантов перемещения среднего стержня и равняются 0,3–0,37 мм. С увеличением угла разведения плоскостей стержней отмечается незначительное увеличение линейного смещения по оси Z (0,58 мм) в положении (1–1) и приведение к средним показателям (0,3 мм) в положении среднего стержня (3–1) (табл. 3).

При воздействии на место перелома силы по оси Y с увеличением угла разведения плоскостей отмечается увеличение линейных смещений в исходном положении (1–1) от 2,19 мм до 3,71 мм, но по мере перемещения среднего стержня от периферии к месту перелома отмечается значительное снижение линейных смещений по оси Z в положении среднего стержня (3–1), равное 1,05–1,12 мм.

При воздействии на место перелома силы по оси Z отмечается значительное линейное смещение по оси Z при разведении плоскостей проведения стержней под углом 30° , равное 8,04 мм в положении (1–1), которое снижается до 2,94 мм в положении среднего стержня (3–1). По мере увеличения угла разведения плоскостей, при 60(1–1) величина смещений равна 5,96 мм, при 90(1–1) – 3,94 мм. По мере перемещения среднего стержня от периферии к месту перелома величина линейных смещений по оси Z снижается с 1,99 мм при 60(3–1) до 1,37 мм в положении стержня 90(3–1).

Таблица 1

Линейные смещения по оси X

Направление усилия	30(1–1)	30(2–1)	30(3–1)	60(1–1)	60(2–1)	60(3–1)	90(1–1)	90(2–1)	90(3–1)
Fy	-0,14	-0,15	-0,16	-0,39	-0,35	-0,29	-0,60	-0,52	-0,39
Fx	1,76	1,75	1,76	1,81	1,80	1,81	1,83	1,83	1,83
Fz	0,37	0,36	0,30	0,58	0,50	0,36	0,52	0,44	0,31

Таблица 2

Линейные смещения по оси Y

Направление усилия	30(1–1)	30(2–1)	30(3–1)	60(1–1)	60(2–1)	60(3–1)	90(1–1)	90(2–1)	90(3–1)
Fy	0,88	0,72	0,53	2,24	1,52	0,9	4,01	2,56	1,39
Fx	-0,14	-0,15	-0,16	-0,39	-0,35	-0,29	-0,60	-0,52	-0,39
Fz	-2,19	-1,54	-0,86	-3,36	-2,1	-1,05	-3,71	-2,27	-1,12

Таблица 3

Линейные смещения по оси Z

Направление усилия	30(1–1)	30(2–1)	30(3–1)	60(1–1)	60(2–1)	60(3–1)	90(1–1)	90(2–1)	90(3–1)
Fy	-2,19	-1,54	-0,86	-3,36	-2,1	-1,048	-3,71	-2,27	-1,12
Fx	0,37	0,36	0,3	0,58	0,5	0,36	0,52	0,436	0,31
Fz	8,04	5,39	2,94	5,96	3,77	1,99	3,94	2,511	1,37

Таким образом, можно сделать следующие **выводы:** для двухплоскостной системы с перпендикулярным проведением крайних стержней в одной плоскости и среднего стержня в другой плоскости (30, 60 и 90°) наиболее выгодными являются положения 60(3-1) и 90(3-1), т.е. средний стержень приближен к месту перелома, угол разведения плоскостей 60–90°.

ОБЪЕМНАЯ СИСТЕМА В ТРЕХ ПЛОСКОСТЯХ «60–90–30»

Технические условия.

Средний стержень (R3) находится от первого стержня на $\frac{1}{4}$ расстояния между крайними стержнями. Плоскость среднего стержня (R3) повернута вокруг оси отломка на 90° относительно плоскости проксимального (L1), плоскость дистального стержня (L2) – на 60° к плоскости стержня L1. «А» – место перелома.

Рассмотрен следующий вариант наклона стержней в плоскости отломка:

1. Схема «60–90–30» (рис. 2). Дистальный (L2) и средний (R3) стержни отклонены на 30° от места перелома, L1 отклонен на 30° к месту перелома.

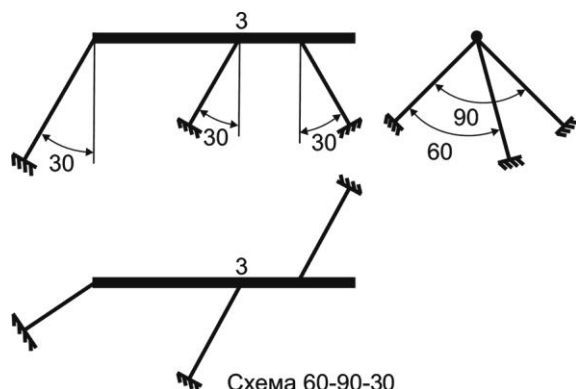


Рис. 2. Пространственное расположение стержней в трех плоскостях

В таблицах 4-6 приведены расчетные линейные деформации (в мм) на место перелома (точка «А»), в зависимости от варианта компоновки (углы наклона стержней).

Таблица 4

Деформации по оси X

Направление усилия	60–90–30
Fy	0,09
Fx	1,02
Fz	-0,83

Таблица 5

Деформации по оси Y

Направление усилия	60–90–30
Fy	0,62
Fx	0,09
Fz	0,30

Если рассматривать весь сегмент конечности, то лучшая жесткость фиксации отломков достигнута, когда в проксимальный и дистальный костные отломки вводят по три стержня аппарата перпендикулярно к оси отломков, при этом средний стержень устанавливают от ближнего к месту перелома стержня на $\frac{1}{4}$ расстояния между крайними стержнями и проводят его под углом 60–90° к плоскости крайних стержней [2].

Таблица 6

Деформации по оси Z

Направление усилия	60–90–30
Fy	0,295
Fx	-0,83
Fz	1,63

Наименьшие смещения при воздействии силы по оси «X» происходят в компоновках аппаратов 60–90–30 (1,02 мм). Воздействие сил по осям Y и Z вызывает незначимые (< 1 мм) смещения и могут не учитываться.

При воздействии силы по оси «X» на место перелома (точка «А») наименьшая величина линейных смещений отмечается в подсистеме (60–90–30) равная 0,09 мм. Воздействие силы по оси Y вызывает смещение 0,62 мм, сила по оси Z – 0,3 мм, т.е. воздействие сил по всем направлениям в любом случае вызывает смещения по оси Y менее 1 мм.

При воздействии силы по оси X на место перелома (точка «А») наименьшей величиной линейного смещения по направлению действия силы является подсистема (60–90–30) у которой смещение равно 0,83 мм, воздействие силы по оси Y вызывает смещение 0,295 мм, силы по оси Z – 1,63 мм.

2. Угловые деформации смещения отломка в месте перелома приведены в таблицах 7-9 (в градусах). Наименьшей величиной деформаций по всем осям характеризуется схема 60–90–30.

Таблица 7

Деформации по оси X

Направление усилия	60–90–30
Fy	0,2005
Fx	-0,5730
Fz	0,1432

Таблица 8

Деформации по оси Y

Направление усилия	60–90–30
Fy	-0,35
Fx	0,07
Fz	-1,43

Таблица 9

Деформации по оси Z

Направление усилия	60–90–30
Fy	0,80
Fx	0,17
Fz	0,01

ВЫВОДЫ

Анализ результатов расчета деформаций трехплоскостных трехстержневых подсистем при различных вариантах компоновки позволяет сделать следующие выводы.

Рассматриваемая стержневая подсистема показывает высокую стабильность, допуская линейные смещения менее 2 мм (до 1,02 по оси X, до 0,62 мм по оси Y, до 1,63 мм по оси Z). При этом наиболее стабильными вариантами рассматриваемых подсистем с наклоном стержней являются 60–90–30.

Если рассматривать весь сегмент конечности, то лучшая жесткость фиксации отломков достигнута, когда в проксимальный костный отломок вводят три стержня аппарата, средний

стержень устанавливают от ближнего к месту перелома стержня на $\frac{1}{4}$ расстояния между крайними стержнями, все стержни вводят под углом 30° к перпендикуляру оси отломка, при этом самый удаленный от места перелома стержень и средний стержень вводят с наклоном от места перелома, а ближний к месту перелома стержень вводят в отломок с наклоном к месту перелома, причем средний стержень вводят с поворотом вокруг оси отломка на 60° от самого удаленного от места перелома стержня и на 30° от ближнего к месту перелома стержня. Аналогичным образом вводят стержни в другой отломок. По результатам исследования получен патент на изобретение № 2281708 [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2281708 Российская Федерация, МКИ А 61 В 17/56. Способ лечения переломов длинных костей / Виноградов В. Г., Лапшин В. Л., Зедгенидзе И. В., Ивлев Б. В., Халиман Е. А., заявитель и патентообладатель Виноградов В. Г., Лапшин В. Л., Зедгенидзе И. В., Ивлев Б. В., Халиман Е. А. – № 204123897/14 ; заявл. 27.01.2006 ; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23. – 1 с.
2. Пат. 2290115 Российская Федерация, МКИ А61В 17/56. Способ лечения переломов длинных костей / Виноградов В. Г., Лапшин В. Л., Зедгенидзе И. В., Ивлев Б. В., Халиман Е. А., заявитель и патентообладатель Виноградов В. Г., Лапшин В. Л., Зедгенидзе И. В., Ивлев Б. В., Халиман Е. А. – № 204123884/14 ; заявл. 10.02.2006 ; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36. – 1 с.

Рукопись поступила 28.07.08.