

УДК 617.541.1

В.Р. Заремба¹, В.А. Кириченко²

Спосіб фіксації титанової коригуючої пластини при хірургічній корекції лійкоподібної деформації грудної клітки та його математичне моделювання

¹КНП «Житомирська обласна дитяча клінічна лікарня» Житомирської обласної ради, Україна

²Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна

Paediatric surgery.Ukraine. 2021. 2(71):21-25; doi 10.15574/PS.2021.71.21

For citation: Zaremba VR, Kyrychenko VA. (2021). Method of fixing titanium pectus bar in surgical correction of funnel chest and its mathematical modeling. Paediatric Surgery.Ukraine. 2(71):21-25; doi 10.15574/PS.2021.71.21.

Найпоширенішою операцією для корекції вродженої лійкоподібної деформації грудної клітки (ВЛДГК) у XXI столітті є операція Nuss. Це втручання супроводжується ускладненнями, пов'язаними як із власне фіксуючою пластиною та її розмірами і розміщенням, так і зі способами її фіксації. Найчастішими з них є зміщення пластини та хронічний больовий післяопераційний синдром. Для такого типу операції застосовуються коригуючі пластини одного розміру (товщина, ширина) для усіх вікових груп.

Мета – розробити та впровадити оригінальну модифікацію операції Nuss з індивідуальним розрахунком мінімальних розмірів коригуючої пластини; нівелювати вірогідність зміщення пластини; зменшити тривалість й інтенсивність післяопераційного больового синдрому.

Матеріали та методи. У дослідженні використано оригінальний метод фіксації коригуючої титанової пластини як монолітної металевої арочної конструкції з жорстко фіксованими кінцями, при якому застосовано субокісне кріплення стабілізаторів пластини до двох ребер із кожного боку. За цим методом прооперовано 34 пацієнтів із ВЛДГК віком від 6 до 17 років.

Результати. Проведено математичне моделювання функціонування коригуючої пластини як монолітної металевої арочної конструкції з жорстко фіксованими кінцями та визначенням її міцності й жорсткості. Як приклад, при розрахунку жорсткості пластини шириною 12 мм та товщиною 2,2 мм за умови використання навантаження у 25 кг (250 Н) та ширини арки у 20 см визначено прогин пластини 3,57 мм, коефіцієнт міцності – 1,8. Навантаження у 250 Н є значно вищими за ті, які реально існують. У жодному з випадків не визначено западіння грудної клітки (прогин пластини) та не виявлено випадків прорізування пластини. Під час аналізу рівня післяопераційного больового синдрому за шкалою NRSP на 4–5-ту добу після операції в пацієнтів із II ступенем ВЛДГК визначено середній бал – 3,74; з III ступенем – 4,18; через місяць після втручання – 1,0 і 1,63 відповідно. Хронізації післяопераційного болю не виявлено.

Висновки. Жорстка субокісна фіксація стабілізаторів пластини до двох ребер із кожного боку запобігає зміщенню пластини. Запропонована методика математичного моделювання розмірів пластини дає змогу індивідуально розрахувати розміри коригуючої пластини, забезпечивши у переважній більшості випадків корекцію деформації пластинами 10, 11, 12 мм. Інтенсивність і тривалість больового синдрому значно менші, ніж при використанні стандартної методики, за рахунок перерозподілу тиску на точки опирання пластини та відсутність травмування міжреберних нервів, зменшення розмірів пластини.

Дослідження виконано відповідно до принципів Гельсінської декларації. Протокол дослідження ухвалено комісією з етики КНП «Житомирська обласна дитяча клінічна лікарня» Житомирської обласної ради, Україна. На проведення досліджень отримано інформовану згоду пацієнтів.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Ключові слова: операція Nuss, лійкоподібна деформація грудної клітки, розміри фіксуючої пластини, спосіб фіксації.

Оригінальні дослідження. Торакальна хірургія

Method of fixing titanium pectus bar in surgical correction of funnel chest and its mathematical modeling

V.R. Zaremba¹, V.A. Kyrychenko²

¹Municipal non-profit institution «Zhytomyr Regional Pediatric Clinical Hospital» Zhytomyr Regional Council», Ukraine

²National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Ukraine

The most common surgery for the correction of congenital funnel chest in the 21st century is the Nuss procedure. This intervention is accompanied by complications related to the actual fixing bar and its size and placement and methods of fixing. The most common of these are bar displacement and chronic postoperative pain. Only one size of corrective bar (thickness, width) is used for this type of operation in all age groups.

Purpose – to develop and implement the original modification of the Nuss procedure with individual calculation of the minimum dimensions of the corrective bar; to eliminate the probability of bar displacement; reduce the duration and intensity of postoperative pain.

Materials and methods. The original method of the correcting titanium bar fixing as a monolithic metal arched structure with rigidly fixed ends was used in the study, the subperiosteal fastening of the bar stabilizers to two ribs on each side was used. This method was used to operate on 34 patients with funnel chest aged from 6 to 17 years.

Results. Mathematical modeling of the functioning of the correcting bar as a monolithic metal arched structure with rigidly fixed ends and determination of its strength and rigidity were performed. As an example, when calculating the stiffness of a plate with a width of 12 mm and a thickness of 2.2 mm under the use of a load of 25 kg (250 N) and an arch width of 20 cm, we determine the deflection of the bar 3.57 mm, strength factor 1.8. The loads of 250 N are much higher than those that actually exist. The cases of depression of the thorax (deflection of the bar) and cases of eruption of the bar were non indicated. The analysis of the level of postoperative pain syndrome on the NRSP scale for 4–5 days after surgery in patients with II degree of funnel chest determined an average score of 3.74; with III degree–4.18; after one month of the operation – 1.0 and 1.63, respectively. Chronic postoperative pain was not noted.

Conclusions. Rigid subperiosteal fixation of the bar stabilizers to two ribs on each side prevents the plate from shifting. The proposed method of mathematical modeling of plate dimensions allows to individually calculate the dimensions of the correcting bar, providing in the vast majority of cases the correction of deformation bars 10, 11, 12 mm. The intensity and duration of the pain syndrome is much less than in standard technique due to the redistribution of pressure on the fulcrums of the bar and the absence of injury to the intercostal nerves, reducing the size of the plate.

The research was carried out in accordance with the principles of the Helsinki declaration. The study protocol was approved by the Zhytomyr Regional Pediatric Clinical Hospital of the Zhytomyr Regional Council, Ukraine. The informed consent of the patient was obtained for conducting the studies.

No conflict of interest was declared by the authors.

Key words: Nuss procedure, funnel chest, fixing bar dimensions, method of fixation.

Способ фиксации титановой корректирующей пластины при хирургической коррекции воронкообразной деформации грудной клетки и его математическое моделирование

V.R. Заремба¹, В.А. Кириченко²

¹КНП «Житомирская областная детская клиническая больница» Житомирского областного совета», Украина

²Национальный университет «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка», Украина

Самой распространенной операцией для коррекции врожденной воронкообразной деформации грудной клетки (ВВДГК) в XXI веке является операция Nuss. Данное вмешательство сопровождается осложнениями, связанными как с собственно фиксирующей пластиной и ее размерами и размещением, так и со способами ее фиксации. Наиболее частыми из них являются смещение пластины и хронический болевой послеоперационный синдром. Для такого типа операции используются корректирующие пластины одного размера (толщина, ширина) для всех возрастных групп.

Цель – разработать и внедрить оригинальную модификацию операции Nuss с индивидуальным расчетом минимальных размеров корректирующей пластины; нивелировать вероятность смещения пластины; уменьшить продолжительность и интенсивность послеоперационного болевого синдрома.

Материалы и методы. В исследовании использован оригинальный метод фиксации корректирующей титановой пластины как монолитной металлической арочной конструкции с жестко фиксированными концами, при котором применено субпериостальное крепление стабилизаторов пластины к двум ребрам с каждой стороны. По этому методу прооперировано 34 пациента с ВВДГК в возрасте от 6 до 17 лет.

Результаты. Проведено математическое моделирование функционирования корректирующей пластины как монолитной металлической арочной конструкции с жестко фиксированными концами и определение ее прочности и жесткости. В качестве примера, при расчете жесткости пластины шириной 12 мм и толщиной 2,2 мм при использовании нагрузки в 25 кг (250 Н) и ширины арки в 20 см определен прогиб пластины 3,57 мм, коэффициент прочности – 1,8. Нагрузка в 250 Н значительно выше тех, которые реально существуют. Ни в одном случае не зарегистрировано западение грудной клетки (прогиб пластины) и не выявлены случаи прорезывания пластины. При анализе уровня послеоперационного болевого синдрома по шкале NRSP на 4–5-е сутки после операции у пациентов со II степенью ВВДГК определен средний балл – 3,74; с III степенью – 4,18; через месяц после вмешательства – 1,0 и 1,63 соответственно. Хронизация послеоперационной боли не выявлена.

Выводы. Жесткая субпериостальная фиксация стабилизаторов пластины к двум ребрам с каждой стороны предотвращает смещение пластины. Предложенная методика математического моделирования размеров пластины позволяет индивидуально рассчитать размеры корректирующей пластины, обеспечив в подавляющем большинстве случаев коррекцию деформации пластинами 10, 11, 12 мм. Интенсивность и продолжительность болевого синдрома значительно меньше, чем при использовании стандартной методики, за счет перераспределения давления на точки опирания пластины и отсутствия травмирования межреберных нервов, уменьшения размеров пластины.

Исследование выполнено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации. Протокол исследования принят комиссией по этике КНП «Житомирская областная детская клиническая больница» Житомирского областного совета, Украина. На проведение исследований получено информированное согласие пациентов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ключевые слова: операция Nuss, воронкообразная деформация грудной клетки, размеры фиксирующей пластины, способ фиксации.

Вступ

Вроджена лікоподібна деформація грудної клітки (ВЛДГК) є досить частою вадою розвитку; зустрічається у 0,1–0,8 на 100 дітей [2–4]. При II–III ступенях лікоподібної деформації більшість пацієнтів потребує хірургічного лікування. Найпоширенішим варіантом хірургічного лікування у XXI столітті є операція Nuss, суть якої полягає в проведенні спеціально вигнутої С-подібної пластины під грудиною між найвищими точками деформації та найбільшим заглибленням із наступним її розворотом і фіксацією [2–4]. Така методика посту-

пово витіснила операцію Ravich як дуже травматичну; крім того, операція Nuss має такі незаперечні переваги як малоінвазивність, косметичність, відносну простоту і швидкість виконання. Водночас операція Nuss має низку ризиків, серед яких розворот і зміщення пластини та (або) прорізання пластини в післяопераційному періоді, потреба в установленні доволі товстої металевої фіксуючої пластини, що травмує міжребер'я (у тому числі і міжреберний нерв, спричинюючи хронічний післяопераційний біль); основними точками опирання пластини є підлегле ребро в місці проникнення фіксуючої пластини в плевральну порожнину; травмування в цьому місці ребра також створює умови для хронізації післяопераційного болю; при виражених проявах дисплазії сполучної тканини може бути причиною сплюснення передньої грудної стінки.

Мета дослідження – обґрунтувати засади індивідуального підбору розмірів коригуючої пластини при виконанні операції Nuss; розробити оригінальну модифікацію такого хірургічного втручання, при якій можлива як мінімізація розмірів коригуючої пластини, так і нівелювання можливості зміщення пластини та зменшення тривалості й інтенсивності післяопераційного больового синдрому.

Матеріали та методи дослідження

Розроблено та впроваджено метод фіксації пластини, який унеможливує такі післяопераційні ускладнення, як її розворот і зміщення; а сама коригуюча пластина функціонує як монолітна металева арочна конструкція з жорстко фіксованими кінцями. Для досягнення цього ефекту нерухомо фіксуються стальними лігатурами № 7 або лавсановою тасьмою 3–5 мм по середніх аксіальних лініях до двох ребер субокісно з кожного боку стабілізатори пластини. За рахунок такого способу фіксації пластина «відпружинює» найглибшу точку деформації і різко зменшує тиск на підлегле ребро в точках проникнення пластини у плевральну порожнину – цей тиск можна коригувати, зміщуючи лігатуру зі сталі чи лавсанової тасьми вздовж ребра, до якого фіксується стабілізатор, на кілька міліметрів.

На базі КНП «Житомирська обласна дитяча клінічна лікарня» Житомирської обласної ради» прооперовано за описаною методикою 34 пацієнтів віком від 6 до 17 років.

Дослідження виконано відповідно до принципів Гельсінської декларації. Протокол дослідження ухвалено комісією із етики КНП «Житомирська обласна дитяча клінічна лікарня» Житомирської обласної ради, Україна. На проведення досліджень отримано інформовану згоду пацієнтів.

Результати дослідження та їх обговорення

Визначення міцності та жорсткості пластини

Метою розрахунку міцності й жорсткості пластини є визначення коефіцієнта запасу міцності та визначення прогинів пластини прямокутного поперечного перерізу при дії зосередженої сили.

$$(b \times h = 1.5 \times 0.22 \text{ см}) \quad (1)$$

Розрахункова схема пластини являє собою стержень із криволінійною віссю, який працює на згин. Виходячи з реальних умов роботи стержня, а саме, жорстке закріплення кінців до ребер (точки А і В), опирання на ребра в третинах прольоту (точки С і D), схему закріплення і навантаження стержня вважаємо такою, як показано на рисунку. За попередніми розрахунками, у місцях можливого опирання на ребра (точки С і D), пластина має практично нульові переміщення, тому сили взаємодії пластини з тканинами тіла мінімальні, отож, у подальших розрахунках їх враховувати не будемо [1,5].

Така розрахункова схема є тричі статично невизначною, тому пряме аналітичне розв'язання є досить громіздким. Проте при заданому співвідношенні розмірів Н/Л можна отримати результати, які в подальшому можна масштабувати при пропорційній зміні цих розмірів пластини (при цьому згинальну жорсткість пластини вважаємо однаковою за довжиною).

Задачу визначення міцності зводимо до визначення коефіцієнта запасу міцності по межі текучості матеріалу (для титану межа текучості $\sigma_T = 840 \text{ МПа}$). Діючі напруження при згині:

$$k = \frac{\sigma_T}{\sigma} = \frac{M_T}{M} = \frac{\sigma_T \times W_x}{M}, \quad (2)$$

де W_x – момент опору поперечного перерізу при згині, для прямокутного перерізу:

$$W_x = \frac{b \times h^2}{6}; \quad (3)$$

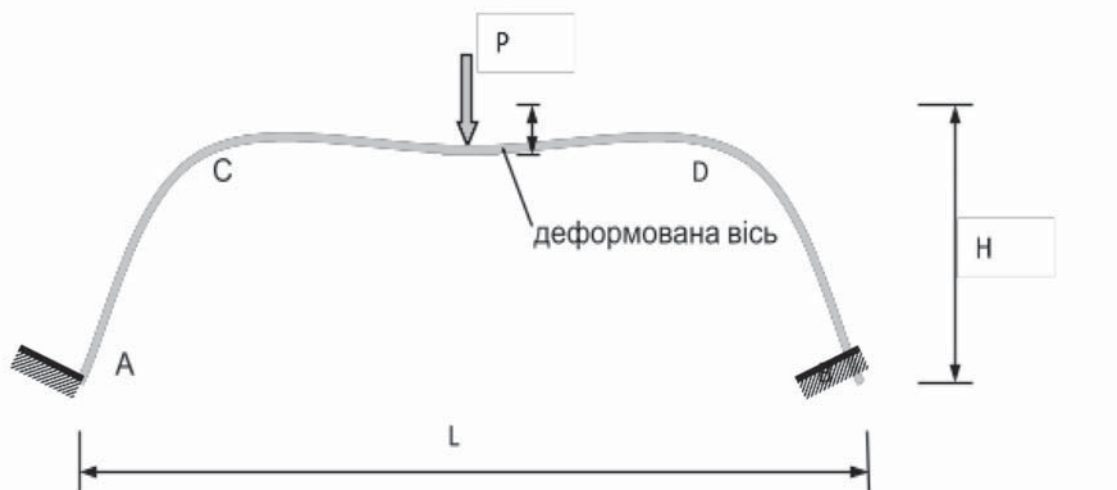


Рис. Схема закріплення і навантаження стержня (коригуючої пластини)

M – значення діючого згинаючого моменту в небезпечному перерізі, яке визначається розрахунком внутрішніх сил [1,5].

Виходячи з орієнтовних співвідношень розмірів грудної клітки, надалі приймаємо в розрахунках співвідношення висоти до ширини розрахункової схеми $H/L=0,4$ (рис.).

Відповідні розрахунки згину зображеної на рисунку пластини вказують, що максимальний згинаючий момент виникає в точці прикладання сили P і дорівнює $M = 0,089P \times L$

Задачу визначення жорсткості зводимо до визначення максимальних прогинів пластини, які матимуть місце в точці прикладання сили.

Згинальна жорсткість пластини:

$$EI_x = E \times \frac{b \times h^3}{12} \quad (4)$$

де E – модуль пружності матеріалу пластини, для титану цей показник $E=112000$ МПа [1,5].

Наприклад, при розмірах перерізу (за формулою 1), згинальна жорсткість дорівнює:

$$E \times I_x = E \times \frac{b \times h^3}{12} = 112000 \times 10^6 \times \frac{1,5 \times 0,22^3}{12} \times 10^{-8} = 1,49 \text{ Нм}^2. \quad (5)$$

Аналогічно, як і при визначенні міцності, можливе масштабування результатів. Розрахунки прогинів для відповідної задачі показують результат:

$$f = 0,00213 \times \frac{P \times L^3}{E \times I_x} \quad (6)$$

Приклад розрахунку

Довжина $L=0,22$ м. Переріз $15 \times 2,2$ мм. Сила $P=300$ Н (30 кг). Згинаючий момент:

$$M = 0,089P \times L = 0,089 \times 300 \times 0,22 = 5,87 \text{ Нм} \quad (7)$$

$$W_x = \frac{b \times h^2}{6} = \frac{1,5 \times 0,22^2}{6} = 0,0121 \text{ см}^3 \quad (8)$$

Напруження:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{5,87}{0,0121} = 485 \text{ МПа} \quad (9)$$

Коефіцієнт запасу міцності:

$$k = \frac{840}{485} = 1,73 \quad (10)$$

Прогин:

$$f = 0,00213 \times \frac{300 \times 0,22^3}{1,49} = 0,0046 \text{ м} = 4,6 \text{ мм} \quad (11)$$

При розрахунку жорсткості пластини шириною 12 мм і товщиною 2,2 за умови використання навантаження у 25 кг (250 Н) і ширини арки у 20 см (пластина, яку використовуємо в дітей молодшого віку) таким

же чином отримуємо прогин 3,57 мм, коефіцієнт міцності – 1,8. Слід зауважити, що прийняті навантаження у 300 та 250 Н є значно вищими за ті, які реально існують. Але й при таких екстремальних навантаженнях отримуємо високий коефіцієнт міцності конструкції (1,7–1,8).

За описаною методикою прооперовано 34 пацієнтів. У жодного з 34 дітей не визначено западіння грудної клітки (прогин пластини) та не виявлено випадків прорізування пластини. Під час оцінювання післяопераційного больового синдрому за шкалою NRSP на 4–5-ту добу після операції отримано такі результати:

– серед прооперованих пацієнтів із II ступенем деформації: 2 бали – 3 (13,04%) пацієнти, 3 бали – 5 (21,74%) пацієнтів, 4 бали – 11 (47,83%) пацієнтів, 5 балів – 3 (13,04%) пацієнти; 6 балів – 1 (4,35%) пацієнт; середній бал – 3,74;

– у пацієнтів із III ступенем деформації: 2 бали – 1 (9,09%) пацієнт, 3 бали – 2 (18,18%) пацієнти, 4 бали – 4 (36,36%) пацієнти, 5 балів – 3 (27,27%) пацієнти; 6 балів – 1 (9,09%) пацієнт; середній бал – 4,18.

Через місяць після операції проанкетовано 26 пацієнтів і отримано такі результати: із II ступенем деформації – 16 (66,6%) пацієнтів; із III – 8 (33,3%) дітей. Серед прооперованих пацієнтів із II ступенем деформації: 1 бал – 8 (50,0%) пацієнтів, 2 бали – 4 (25%) пацієнти, 0 балів – 4 (25,0%) пацієнти; середній бал – 1,0. Серед пацієнтів із III ступенем деформації: 1 бал – 2 (25%) пацієнти; 2 бали – 4 (50%) пацієнти; 3 бали – 1 (12,5%) пацієнт; 0 балів – 1 (12,5%) пацієнт; середній бал – 1,63.

Випадків хронізації післяопераційного болю не виявлено.

Висновки

Метод жорсткої фіксації стабілізаторів коригуючої пластини до двох ребер із кожного боку унеможлиблює найчастіше ускладнення операції Nuss – вивих пластини.

Такий спосіб фіксації розподіляє навантаження на 3 ребра з кожного боку, особливо зменшуючи навантаження на підлегле ребро в місці проникнення коригуючої пластини у плевральну порожнину.

Проведені обрахунки (математичне моделювання) для критичних навантажень (у 300 та 250 Н) на титанову пластину розмірами відповідно 15×2,2×360 мм (крупний пацієнт віком 17 років) та 12×2,2×280 мм (пацієнт віком 12 років) довели можливість зменшення ширини пластини, оскільки прогини пластини прогноуються в обох випадках 4,6 і 3,6 мм із коефіцієнтом запасу міцності у 1,7 і 1,8.

Розраховані прогини пластини навіть при дії таких критичних навантажень зменшуються, оскільки підпружинювальна дія арочної монолітної конструкції на задню стінку грудини приведе її у фізіологічне положення доволі швидко. Це підтверджено при спостереженні за пацієнтами впродовж 1–2 років після операції – жодних ознак прогинання грудино-реберного комплексу не виявлено.

При запропонованому способі фіксації та індивідуальному розрахунку розмірів коригуючої пластини відзначаються низькі рівні післяопераційного больового синдрому та відсутня його хронізація.

Фінансування. Дослідження виконано власним коштом.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References/Література

1. Feodosev VI. (1986). Soprotivlenie materialov. Uchebnik dlya VTUZov. Moskva: Nauka: 512. [Феодосьев ВИ. (1986). Сопротивление материалов. Учебник для ВТУЗов. Москва: Наука: 512].
2. Jose Ribas Milanez de Campos, Miguel Lia Tedde. (2016). Management of deep pectus excavatum (DPE) Ann Cardiothorac Surg. 5 (5): 476–484.
3. Kubiak R, Habelt S, Hammer J, Hacker FM, Mayr J, Bielek J. (2007). Pulmonary function following completion of Minimally Invasive Repair for Pectus Excavatum (MIRPE). Eur J Pediatr Surg. 17: 255–260.
4. Nuss D, Kelly RE. (2014). The minimally invasive repair of pectus excavatum. Oper Tech Thorac Cardiovasc Surg. 19 (3): 324–347.
5. Piskunov VH. (1999). Opir materialiv z osnovamy teorii pruzhnosti y plastychnosti. Za red. VH Piskunova. Kn. 1–3. Kyiv: «Vyscha shkola»: 204. [Піскунов ВГ. (1999). Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності. За ред. ВГ Піскунова. Кн. 1–3. Київ: Вища школа: 204].

Відомості про авторів:

Заремба Віталій Ростиславович – лікар-хірург дитячий вищої кваліфікаційної категорії Житомирської обласної дитячої клінічної лікарні. Адреса: Житомирський район, с. Станишівка, шосе Сквирське, 6.

Кириченко Володимир Анатолійович – к.тех.н., доц. каф. залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Національного університету «Полтавська політехніка імені Ю. Кондратюка», заст. директора Інституту архітектури та будівництва. Адреса: м. Полтава, Першотравневий проспект, 24.

Стаття надійшла до редакції 29.12.2020 р., прийнята до друку 17.05.2021 р.