

УДК 624.155.15:627.418:624.046.2

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ПРОФИЛЕЙ СТАЛЬНОГО ШПУНТА ВЫСОКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

НОСЕНКО О. П., к. т. н., доц.

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепр, 49600, Украина, тел. +38(050)451-01-36, e-mail: nosenko@mail.pgasa.dp.ua

Аннотация. Постановка проблемы. В настоящее время возникла необходимость разработать и изложить новую концепцию проектирования профилей стального шпунта высокой несущей способности. **Методика.** Концепция проектирования профилей стального шпунта высокой несущей способности разрабатывалась на основе показателей (критериев) эффективности фасонных профилей, работающих на изгиб. **Результаты.** На основании новой концепции разработаны два профиля высокой несущей способности – профиль Ларсен-7 ($W = 5\,010\text{ см}^3/\text{м шп. ст.}$) и профиль Ларсен-7Н ($W = 5\,200\text{ см}^3/\text{м шп. ст.}$). Момент сопротивления 1 м шпунтовой стенки был увеличен в 1,6...1,7 раза. **Научная новизна.** Проектирование профилей было осуществлено впервые исходя из основных положений новой концепции проектирования фасонных профилей. **Практическая значимость.** Профили шпунтовых свай высокой несущей способности разработаны впервые. Они предназначены для глубоководных портовых гидротехнических сооружений. Их внедрение обеспечит существенную экономию металла (до 20 %) и сокращение сроков строительства.

Ключевые слова: стальной шпунт; шпунтовая свая; шпунтовая стенка; момент сопротивления; несущая способность

НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОФІЛІВ СТАЛЕВОГО ШПУНТА ВИСОКОЇ НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ

НОСЕНКО О. П., к. т. н., доц.

Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. (050) 451-01-36, e-mail: nosenko@mail.pgasa.dp.ua

Анотация. Постановка проблемы. Наразі виникла необхідність розробити і викласти нову концепцію проектування профілів сталевго шпунта високої несної здатності. **Методика.** Концепція проектування профілів сталевго шпунта високої несної здатності розроблялась на основі показників (критеріїв) ефективності фасонних профілів, що працюють на вигин. **Результати.** На основі нової концепції розроблено два профілі високої несної здатності – профіль Ларсен-7 ($W = 5\,010\text{ см}^3/\text{м шп.ст.}$) та профіль Ларсен-7Н ($W = 5\,200\text{ см}^3/\text{м шп. ст.}$). Момент опору 1 м шпунтової стінки був збільшений в 1,6 1,7 раза. **Наукова новизна.** Проектування профілів було здійснено вперше виходячи з основних положень нової концепції проектування фасонних профілів. **Практична значимість.** Профілі шпунтових палів високої несної здатності розроблено вперше. Вони призначені для глибоководних портових гідротехнічних споруд. Їх упровадження забезпечить істотну економію металу (до 20 %) та скорочення строків будівництва.

Ключові слова: сталевий шпунт; шпунтова паля; шпунтова стінка; момент опору; несна здатність

JUSTIFICATION OF PROFILES' DEVELOPMENT OF STEEL SHEET PILE OF HIGH LOAD-CARRYING CAPACITY

NOSENKO O.P., *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskogo str., 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. (050) 451-01-36, e-mail: nosenko@mail.pgasa.dp.ua

Abstract. Statement of the problem. Currently, the need arose to develop and present new concept of a new design of profiles of steel sheet pile of high load-carrying capacity. **Methods.** The design concept of profiles development of steel sheet piles of high load-carrying capacity is being developed on the basis of efficiency indexes (criteria) of shaped profiles working in bending. **Results.** Based on a new concept are developed two profiles of high load-carrying capacity – the first sheet piling section – Larssen 7 ($W = 5\,010\text{ cm}^3/\text{m shp.}$); and the second the second sheet piling section – Larssen-7H ($W = 5\,200\text{ cm}^3/\text{m shp.}$). The moment resistance of 1 meter of sheet pile wall was increased in 1,6...1,7 times. **Scientific novelty.** For the first time ever the profiles design was carried out due to the principles of a new concept of shaped profiles. **Practical effect.** The profiles of steel sheet pile of high load-carrying capacity were developed at first. They are intended for deep-water port hydraulic structures. Their introduction will provide substantial metal saving (to 20 %) and reduction of construction terms.

Keywords: steel sheet pile; sheet pile wall; sheet piling section; moment resistance; load-carrying capacity

Введение

В существующей концепции разработки профилей, работающих на изгиб, принято считать (на примере двутавровой балки), что чем дальше будет отнесен материал элемента профиля от своей оси симметрии X–X к наружным волокнам полки профиля и чем тоньше будет стенка профиля (с учетом устойчивости профиля), тем рациональней будет распределение материала в плоскости поперечного сечения профиля и тем эффективней он будет [1–6].

В соответствии с изложенной концепцией были разработаны новые стандарты экономичных профилей (УКРНИИМЕТ) – это ГОСТ 8239- (двутавровые балки), ГОСТ 8240-... (швеллеры) и др. Таким же образом поступили и за рубежом при разработке стандартов на профили шпунтовых свай.

Общепринята традиционная концепция, при которой увеличение несущей способности 1 м шпунтовой стенки достигается только увеличением высоты профиля стального шпунта до предельного значения по условиям прочности оборудования и утолщения стенки профиля (по условиям расчета справочных величин), в том числе с перераспределением материала из полки профиля в стенку, наиболее удаленного элемента профиля от нейтральной оси шпунтовой стенки. Разработчики профилей шпунтовых свай сумели достичь только предельного значения момента сопротивления 1 м шпунтовой стенки, равного $3\,200\text{ cm}^3/\text{м шп. ст.}$

Цель работы

Целью настоящей разработки является возможность проектирования профилей шпунтовых свай высокой несущей способности для глубоководных портовых гидротехнических сооружений ($W \geq 3\,200\text{ cm}^3/\text{м шп. ст.}$).

Результаты

Получила развитие концепция проектирования горячекатаных профилей шпунтовых свай высокой несущей способности и повышенной технологичности, предназначенных для глубоководных гидротех-

нических сооружений. Концепция отличается тем, что она построена на основе рационального распределения материала в плоскости поперечного сечения горячекатаного профиля шпунтовой сваи, при этом удельная гибкость полки профиля понижена в 1,3...1,6 раза, а центр тяжести полки профиля смещен вверх от середины их высоты на 30...60 %, что обеспечивает повышение несущей способности шпунтовой стенки в 1,6...1,7 раза, показателя удельного использования материала (W/G , $\text{cm}^3/\text{кг}$) на 15...20 %, повышение показателя концентрации материала в профиле ($W/F \cdot h$ – новое толкование показателя С. В. Тимошенко) на 3,5...11 % и эффективность профиля ($W/(F \cdot h) \cdot F_{\text{ст.}}/F_{\text{полк.}}$ – предложенный новый показатель) на 30...70 % [7].

Предлагаемая новая концепция основывается на новом толковании критериев эффективности фасонных профилей, работающих на изгиб:

1. Критерий рациональности поперечного сечения профиля – $\alpha_{\text{рац.}} = F_{\text{ст.}} / F_{\text{проф.}}$;
2. Критерий концентрации материала в профиле – $\alpha_{\text{конц.}} = W/F \cdot h$
3. Критерий эффективности профиля – $\alpha_{\text{эф.}} = W/(F \cdot h) \cdot F_{\text{ст.}}/F_{\text{полк.}}$;
4. Удельный показатель использования материала в профиле – $A = W/G\text{ cm}^3/\text{кг}$.

Применение новой концепции при проектировании профилей стального шпунта позволило увеличить в 1,6...1,7 раза несущую способность 1 м шпунтовой стенки. На основании этой концепции были разработаны два горячекатаных профиля шпунтовой сваи (Ларсен-7 и Ларсен-7Н) высокой несущей способности (рис. 1, 2).

Профиль шпунтовой сваи Ларсен-7 ($W = 5\,010\text{ cm}^3/\text{м шп. ст.}$) был разработан и освоен в условиях рельсобалочного цеха ДМК им. Дзержинского при жестких технологических ограничениях, что обусловило увеличение удельного показателя использования материала с 12,4 только до 14,8 $\text{cm}^3/\text{кг}$ (рис.1).

Профиль шпунтовой сваи Ларсен-7 применялся при строительстве международной паромной переправы (порт Клайпеда, Литва) взамен ранее планируемых к

применению на этом объекте сварного шпунта высокой несущей способности зетового профиля.

Профиль шпунтовой сваи Ларсен-7Н ($W = 5\,200\text{ см}^3/\text{м шп. ст.}$) был разработан для включения в пусковой сортамент проектируемого универсально-балочного стана на металлургическом комбинате «Азовсталь» (рис. 2). Удельный показатель использования материала профиля Ларсен-7Н – $17,0\text{ см}^3/\text{кг}$, что превышает существующий нормативный показатель, равный $A = 16,0\text{ см}^3/\text{кг}$.

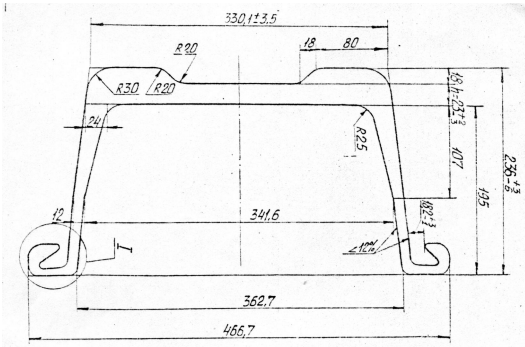


Рис. 1. Профиль шпунтовой сваи высокой несущей способности Ларсен-7 / Fig. 1. Profile sheet piles of high bearing capacity Larssen-7

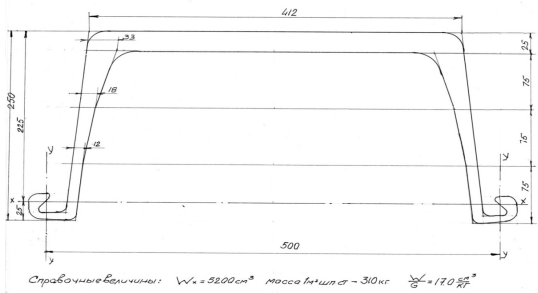


Рис. 2. Профиль шпунтовой сваи высокой несущей способности Ларсен-7Н / Fig. 2. Profile sheet piles of high bearing capacity Larssen-7N

На рисунках 3 и 4 представлены профили шпунтовой сваи Ларсен VI, разработанный в 50-х годах прошлого века и профиль шпунтовой сваи Ларсен Vs, разработанный в соответствии с новыми Евростандартами. На примере этих двух профилей рассмотрим, каким образом совершенствовались профили шпунтовых свай при разработке нового Евростандарта.

Первое, что мы видим на рисунках – это одинаковая высота профилей (250 мм). Одинаковая высота профилей зарубежного стандарта свидетельствует только о том, что она является предельной даже для современных прокатных станков – отсутствовала возможность ее увеличения с тем, чтобы изменить в

большую сторону расстояние от оси симметрии шпунтовой стенки до крайних волокон стенки шпунтины и таким образом увеличить момент сопротивления (в чистовом – финишном калибре высота «яблока» – ручья калибра нижнего вала была увеличена всего на 2,9 мм при неизменной высоте ручья калибра верхнего вала). На ДМК им. Дзержинского прокатывали шпунтовые профили Ларсен-Vs и Ларсен-4, высота которых была равна соответственно 196 и 202,5 мм (профили были скопированы в 50-х годах прошлого века с французского сортамента шпунтовых свай).

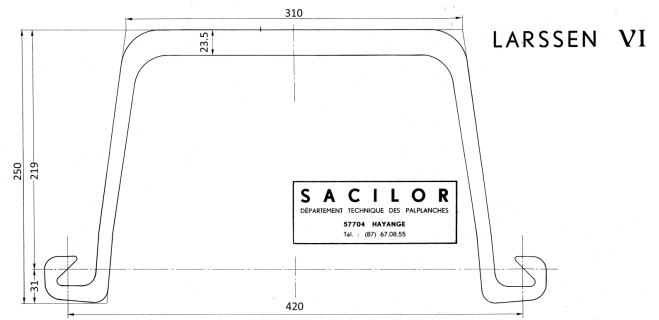


Рис. 3. Профиль шпунтовой сваи Ларсен VI ($W = 4\,200\text{ см}^3/\text{м шп. ст.}$) / Fig. 3. Profile sheet piles Larssen VI ($W = 4\,200\text{ см}^3/\text{м шп.}$)

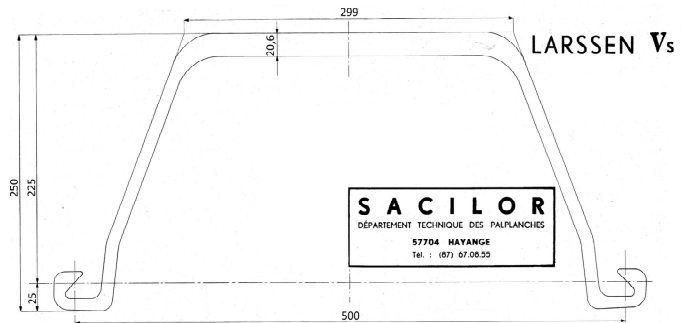


Рис. 4. Профиль шпунтовой сваи Ларсен Vs ($W = 3\,200\text{ см}^3/\text{м шп. ст.}$) / Fig. 4. Profile sheet piles Larssen Vs ($W = 3\,200\text{ см}^3/\text{м шп.}$)

Второе, что мы видим на представленных рисунках, – это увеличение ширины шпунтин с 420 до 500 мм. Помимо того, что увеличение ширины шпунтины до 500 мм упрощает процесс проектирования гидротехнических сооружений (на один погонный метр причала приходится всего две шпунтины, а не 2,38 штуки при использовании шпунтовой сваи Ларсен-Vs), увеличение ширины шпунтин приводит к увеличению удельного показателя использования материала – наиболее важного экономического показателя при выборе профиля для конструкции шпунтовой стенки. Сопоставляя этот

показатель для рассматриваемых двух профилей, видим, что удельный показатель использования материала в профиле Ларсен 5S ($W = 3\ 200\ \text{см}^3/\text{м шп. ст.}$) выше, чем у профиля Ларсен VI ($W = 4\ 200\ \text{см}^3/\text{м шп. ст.}$). Эти показатели соответственно равны 15,09 и 14,48. Исходя из этих показателей производство профиля Ларсен VI было прекращено и заменено производством профиля Ларсен Vs. Необходимая несущая ($W/(F \cdot h) \cdot F_{\text{ст.}}/F_{\text{полк}}$) способность ($M = \sigma_{0,2} \sigma_{0,2} W$) при применении профиля Ларсен Vs обеспечивалась применением сталей повышенной или высокой прочности. Таким примером является строительство аэропорта «Schiphol» в Амстердаме, где был использован стальной шпунт Ларсен Vs, изготовленный из высокопрочной стали марки E 430.

Третье, что мы видим на представленных рисунках, – это разная толщина полок шпунтин (в двутавровых балках стенка двутавра соответствует полке шпунтин). В профиле Ларсен VI толщина полок равна 14 мм. В профиле Ларсен Vs – 11 мм. Утонение толщины полок в профиле шпунтовой сваи Ларсен Vs было обусловлено дальнейшим стремлением увеличить справочные величины шпунтового профиля [7].

Утонение полок шпунтовой сваи взаимосвязано с массой материала, сосредоточенной в стенке шпунтового профиля. Эта взаимосвязь определяется технологическими параметрами формоизменения и деформации раскатов шпунтового профиля на прокатном стане: материал в раскатах при прокатке шпунтовых профилей должен быть так распределен в плоскости поперечного сечения профиля, чтобы обеспечить его прямолинейный выход из калибров прокатной клетки. Соотношение площадей стенки и полок в профиле Ларсен VI составляет 2,39. Это же соотношение в профиле Ларсен Vs – 2,15. Оно примерно такое же, но даже несколько ниже, что благоприятно сказывается на процессе производства этого профиля шпунтовой сваи.

Общепринято считать, что увеличение справочных величин профилей, работающих на изгиб, достигается (на примере двутавровой балки) увеличением расстояния от оси симметрии профиля двутавра (от нейтральной оси шпунтовой стенки для шпунтовых профилей), увеличением массы материала участка профиля наиболее удаленного от оси симметрии профиля (полка двутавра, а для шпунтин – стенок профиля) и максимально возможным утонением стенок профиля для двутавра, исходя из условий устойчивости профиля (для шпунтин – полок профиля).

Рассмотрев принятое направление дальнейшего совершенствования профиля шпунтовой сваи при разработке сортамента Евростандарта, в результате

выполненного нами анализа можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствует возможность дальнейшего увеличения высоты профиля – увеличения расстояния от горизонтальной нейтральной оси шпунтовой стенки до наружных волокон стенки шпунтового профиля.

2. Отсутствует возможность произвольного увеличения массы стенки профиля шпунтовой сваи, поскольку существует объективная закономерность в распределении материала в плоскости поперечного сечения профиля в зависимости от степени утонения полок профиля (в зависимости от материала, сосредоточенного в полках профиля).

3. Выполнено максимально возможное утонение полок шпунтины по всей длине полок профиля исходя из условия устойчивости профиля при его забивке в грунт (толщина полок профиля по всей длине постоянная).

Таким образом, в соответствии с известной концепцией, изложенной выше, и принимаемой при разработке новых фасонных профилей, работающих на изгиб, при разработке Евростандарта были достигнуты предельные возможности совершенствования профилей шпунтовых свай. Дальнейшее повышение несущей способности шпунтовых профилей должно быть обеспечено за счет их изготовления из сталей повышенной или высокой прочности.

Разработку профиля шпунтовой сваи высокой несущей способности можно проиллюстрировать на примере разработки профиля Ларсен-7Н (рис. 2).

В Западноевропейских странах стальной шпунт производится в соответствии с Еuronormами. Базовые характеристики европейского стального шпунта: момент сопротивления 1 м шпунтовой стенки, равный $3\ 200\ \text{см}^3/\text{м шп. ст.}$, ширина между сопряженными шпунтинами равна 500 мм, высота профиля – 250 мм. На проектируемом совместно с германской фирмой «Siemens» универсально-балочном стане в условиях ЧАО «МК Азовсталь» в пусковой сортamente включен профиль шпунтовой сваи Ларсен Vs (рис. 4).

Основной недостаток еврошпунта (аналог разработанного нового профиля Ларсен-7Н) – ограничение момента сопротивления 1 м шпунтовой стенки величиной $3\ 200\ \text{см}^3$.

Другой существенный недостаток еврошпунта (аналога) – его тонкостенность, обусловленная известными положениями концепции, взятой за основу при разработке этого профиля (максимально возможный перенос материала из полок в стенку профиля).

Тонкостенность полок профиля еврошпунта постоянной толщины (10,5...11,5 мм при длине 260 мм и более) является основной причиной его деформаций (размочаливание верхнего торца сваи при

забивке в грунт), в результате чего свая не достигает проектных отметок.

Вследствие того, что при разработке рассматриваемого профиля еврошпунта придерживались общепринятой традиционной концепции, при которой увеличение несущей способности 1 м шпунтовой стенки достигалось только увеличением высоты профиля до предельного значения по условиям прочности оборудования (в нашем случае 250 мм) и некоторого утолщения стенки профиля, в том числе с перераспределением материала из полок профиля в стенку, разработчики профиля сумели достичь только предельного для себя значения момента сопротивления 3 200 см³/м шп. ст.

С целью решения вопросов как повышения несущей способности стального шпунта за счет изменения размеров элементов поперечного сечения профиля без изменения его габаритных размеров (высоты 250 мм и ширины между сопряженными сваями 500 мм), так и повышения местной устойчивости полок профиля, нами был разработан в соответствии с патентом Украины на изобретение № 109517 новый профиль шпунтовой сваи Ларсен-7Н (рис. 2) высокой несущей способности – $W = 5\,200\text{ см}^3/\text{м шп. ст.}$ [8].

Разработка нового профиля повышенной несущей способности решила следующие проблемы:

- повысила несущую способность профиля шпунтовой сваи без изменения его высоты и базовой ширины до значения большего, чем 3 200 см³/м шп. ст. – до 5 200 см³/м шп. ст., т. е. в 1,63 раза. При этом распределение материала в плоскости поперечного сечения профиля осталось в тех же пределах, что и у аналога (соотношение площади

стенки к площадям полок равно 0,26 при 0,29 у аналога, показатели рациональности профиля соответственно 0,481 и 0,530);

- увеличила удельный показатель использования материала с 15,1 (аналог) до 17,0 см³/кг, при этом удельный показатель использования материала оказался даже выше нормативного значения – 16,0 см³/кг;

- увеличила продольную жесткость полок профиля (уменьшение их деформативности при забивке в грунт);

- повысился показатель концентрации материала в профиле на 11,0 %;

- повысился показатель эффективности профиля на 70 %.

Выводы

1. Разработана новая концепция проектирования профилей шпунтовых свай высокой несущей способности.

2. Новая концепция проектирования профилей шпунтовых свай высокой несущей способности построена на основе рационального распределения материала в поперечном сечении горячекатаного профиля шпунтовой сваи, при этом удельная гибкость полок профиля понижена в 1,3...1,6 раза, а центр тяжести полок профиля смещен вверх от середины их высоты на 30...60 %

3. На основании этой концепции были разработаны два горячекатаных профиля шпунтовой сваи (Ларсен-7 и Ларсен-7Н) высокой несущей способности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ложкин Б. Г. Теоретические основы построения сортамента прокатной стали / Б. Г. Ложкин. – Вестник инженеров и техников. – 1956. – № 6. – С. 240–245.
2. Ложкин Б. Г. Еще раз о теоретических основах построения сортамента / Б. Г. Ложкин. – Вестник инженеров и техников. – 1953. – № 3. – С. 127–133.
3. Ложкин Б. Г. Теоретические основы построения сортамента фасонных профилей общего назначения / Б. Г. Ложкин // Научно-техническое совещание «Рационализация профилей проката». – Москва : Профиздат, 1956. – С. 11–20.
4. Вахуркин В. М. Вопросы теории построения сортаментов прокатных профилей / В. М. Вахуркин. – Вестник инженеров и техников. – 1952. – № 2. – С. 68–72.
5. Вахуркин В. М. Об улучшении сортамента прокатных сталей для строительства / В. М. Вахуркин. – Стандартизация. – № 8. – 1952. – С. 13–16.
6. Мельников Н. П. Металлические конструкции. Современное состояние и перспективы развития : монография / Н. П. Мельников. – Москва : Стройиздат, 1983. – 543 с.
7. Носенко О. П. Разработка профиля шпунтовой сваи типа Ларсен повышенной несущей способности / О. П. Носенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – С. 10–14.
8. Носенко О. П. Освоение профиля шпунтовой сваи повышенной несущей способности (ч. 3) / О. П. Носенко // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 5–6. – С. 102–107.

REFERENCES

1. Lozhkin B.G. *Teoreticheskie osnovy postroeniya sortamenta prokatnoj stali* [Theoretical basis for the design of a product rolled steel]. *Vestnik inzhenerov i tehnikov* [Bulletin of engineers and technicians]. 1956, no. 6, pp. 240–245. (in Russian).

2. Lozhkin B.G. *Esche raz o teoreticheskikh osnovah postroeniya sortamenta* [Again about the theoretical bases of creation of assortment]. *Vestnik inzhenerov i tehnikov* [Bulletin of engineers and technicians]. 1953, no. 3, pp. 127–133. (in Russian).
3. Lozhkin B.G. *Teoreticheskie osnovy postroenie sortamenta fasonnyh profilej obshchego naznacheniya* [Theoretical basis of building of a product profile for General purpose]. Scientific-technical conference "Rationalization of rolled profiles". Moscow: Profizdat Publ., 1956, pp. 11–20. (in Russian).
4. Vakhurkin V.M. *Voprosy teorii postroeniya sortamentov prokatnyh profilej* [Theory building assortments rolled sections]. *Vestnik inzhenerov i tehnikov* [Bulletin of engineers and technician]. 1952, no. 2, pp. 68–72. (in Russian).
5. Vakhurkin V.M. *Ob uluchshenii sortamenta prokatnyh stalej dlya stroitel'stva* [On the improvement of the assortment of rolling steel for the construction]. *Standartizaciya* [Standardization]. No. 8, 1952, pp. 13–16. (in Russian).
6. Melnikov N.P. *Metallicheskie konstrukcii. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Metal construction. Current state and prospects of development]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1983, 543 p. (in Russian).
7. Nosenko O.P. *Razrabotka profilya shpuntovoj svai tipa Larsen povyshennoj nesuschej sposobnosti* [Development profile sheet piles type Larsen extra load]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij* [East European journal of advanced technologies]. 2016, pp. 10–14. (in Russian).
8. Nosenko O.P. *Osvoenie profilya shpuntovoj svai povyshennoj nesuschej sposobnosti (ch. 3)* [Development profile sheet piles of high bearing capacity (vol. 3)]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and practice of metallurgy]. 2012, no. 5–6, pp. 102–107. (in Russian).

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. Л. Красовским (Украина), д-ром техн. наук, проф. Е. А. Егоровым (Украина).

Поступила в редколлегию 19.12.2016

Принята к печати 21.12.2016