

УДК 621.771

Ершов С. В.
Мельник С. Н.
Самохвал В. М.
Кравченко Е. А.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ВЫХОДА ИЗ ВАЛКОВ ШПУНТОВОЙ СВАИ КОРЫТНОГО ТИПА

Профили П-образной формы с отогнутыми краями и вертикальной осью симметрии применяют во многих отраслях народного хозяйства. К ним относятся и шпунтовые сваи корытной формы, называемые сваи Ларсена [1]. Горячекатаные шпунтовые сваи применяют с 1910 года в основном в гидротехническом строительстве для сооружения различных перемычек, а именно при строительстве причалов, нефтетерминалов, хранилищ отходов, мостов, зданий, укреплении берегов водоемов. Эти профили препятствуют оползанию грунта в котлован и затоплению огороженной территории. Специфические особенности процесса прокатки таких профилей обусловлены сложной формой их поперечного сечения и наличием значительной неравномерной деформации. Современный рынок металлопродукции с учетом высоких требований потребителей к качеству и к геометрическим показателям профиля требует усовершенствования технологии прокатки шпунтовых свай с учетом этих требований, а также снижение себестоимости производства. Достичь необходимого эффекта невозможно без усовершенствования действующих калибровок валков. В связи с этим представляет актуальность проведение исследования с дальнейшим усовершенствованием калибровок валков для прокатывания П-образных профилей.

В ряде случаев валки станов дуо выполняют с разницей в диаметрах до 1 % для обеспечения заданного изгиба переднего конца полосы в сторону валка с меньшим диаметром и упрощения конструкции приводной арматуры. В других случаях диаметры валков могут отличаться до 5–10 %. Разница в диаметрах валков влияет на параметры прокатки [2]. Изгиб полосы происходит из-за различия скорости движения точек на нижней и на верхней поверхностях профиля. Важная особенность процесса прокатки в валках неравного диаметра – изгиб полосы при выходе из очага деформации. Если диаметр нижнего валка больше диаметра верхнего, то нижний валок сообщает прокатываемой полосе большую скорость, чем верхний валок, точки на нижней поверхности профиля будут двигаться быстрее, чем на верхней поверхности, а полоса будет изгибаться вверх [3].

Однако эксперименты [4] показывают, что выходящий конец полосы, в зависимости от условий деформации, может изгибаться как на валок меньшего, так и большего диаметра. Основным фактором, определяющим характер изгиба полосы, является величина относительного обжатия.

При относительном обжатии до 30–40 % полоса изгибается в сторону валка меньшего диаметра, а при больших обжатиях – на валок большего диаметра. Эксперименты показали, что общий характер изменения кривизны полосы в зависимости от степени деформации сохраняется при прокатке образцов разной толщины и при разном соотношении диаметров валков. Изгиб полосы происходит вследствие неравномерности обжатий, которые выполняются каждым из валков [2].

При прокатке сортовой стали за счет расположения калибра с верхним давлением можно обеспечить устойчивое отклонение полосы вниз после выхода из валков, что исключает необходимость установки верхних выводных проводок, установка которых значительно сложнее, чем нижних [3].

Почти всегда, как только разговор заходит о расположении калибров на валках, сразу же это расположение связывают с понятием нейтральной линии калибра (НЛК). Под НЛК обычно понимают такую линию, относительно которой моменты сил, приложенные к прокатываемой полосе со стороны нижнего и верхнего валков, равны между собой [5].

При определении положения нейтральной линии калибра (НЛК) используются различные методы, среди которых:

1. в качестве НЛК принимают горизонтальную линию, которая делит площадь калибра на две равные части. Практические способы построения такой линии предложены И. И. Кучко, Д. И. Старченко;

2. в качестве НЛК принимают горизонтальную линию, проходящую через центр тяжести площади калибра. При этом положение центра тяжести сечения сложного профиля можно определить экспериментально, используя шаблон профиля, или аналитически, составив уравнение статических моментов сечения профиля относительно произвольной горизонтальной оси;

3. в качестве НЛК принимают горизонтальную линию, разделяющую калибр таким образом, что при совмещении её со средней линией валков (СЛВ) средние значения радиусов точек калибра на верхнем и на нижнем валках будут одинаковы. М. С. Мутьев предложил более совершенный способ определения средних радиусов точек калибра на верхнем и на нижнем валках, учитывающий протяженность различных участков контуров калибра, имеющих разный наклон.

Ни один из описанных методов определения НЛК не является вполне совершенным, так как не связывает положение НЛК с процессами пластической деформации в калибре, а ориентируется только на конфигурацию калибра [3].

Если предположить равенство средних удельных давлений со стороны нижнего и верхнего прокатных валков и исключить изгиб полосы, то равновесие полосы в калибрах развернутого типа (швеллерные, угловые и зетообразные калибры), несимметричных относительно продольно-горизонтальной плоскости, следует определять, исходя из равенства проекций контактных площадей со стороны нижнего и верхнего валков [6].

При определении НЛК в случае неравномерного распределения обжатий необходимо учитывать форму раската, задаваемого в рассматриваемый калибр. Между тем, распределение обжатий по калибру учитывается в модифицированном методе Любке. По этому способу НЛК проводится на половине расстояния между центрами тяжести контуров калибра в каждом валке. При этом части контуров, не подвергающиеся обжатию или подвергающиеся обжатию лишь в результате уширения, при определении центра тяжести во внимание не принимаются. Однако при неравномерном распределении обжатия нельзя определить нейтральную линию без учета формы профиля, входящего в рассматриваемый калибр [5].

При неправильном положении НЛК, когда катающие диаметры и окружные скорости валков неодинаковы, валок с большим катающим диаметром является ведущим и через полосу увлекает за собой валок с меньшим катающим диаметром.

Изгиб полосы за счет неравенства катающих диаметров является причиной сильного износа привальной арматуры (выводных проводок) и может вызвать оковывание полосы вокруг валка.

Таким образом, правильное положение НЛК обеспечивает:

1. прямолинейный выход полосы из валков;
2. отсутствие ударов и излишних напряжений в муфтах и шпинделях;
3. меньший расход энергии при прокатке;
4. меньший износ калибров;
5. отсутствие напряжений и трещин в прокатываемой полосе, т. е. отсутствие растяжения внешних слоев металла вследствие разности скоростей;
6. надежную работу привальной арматуры [7]

В работе [8] было рассмотрено исследование построения НЛК на основе смещенных объемов, которые позволяют в отдельных случаях учесть неравномерность обжатия между валками.

Таким образом, проблема определения размеров валков и заготовки имеет особо важное значение при прокатке в разрезных и формообразующих калибрах, особенностью которых и является деформация в условиях значительной неравномерности распределения обжатий по ширине.

Не смотря на то, что работы по изучению формоизменения П-образных профилей проводились разными учеными [9, 10], проблема формоизменения остается актуальной, а методы построения формообразующих калибров до сих пор не упорядоченные. В частности, отсутствуют согласованность допустимой неравномерности деформации по отдельным элементам формообразующего калибра, обеспечение максимальной точности и технологичности калибровок и определение НЛК.

Целью работы является исследование прямолинейности выхода шпунтового профиля из валков, а также сопоставление экспериментальных и теоретически полученных данных о течении металла в качественном виде.

Теоретическое исследование проводилось по исходным данным ранее проведенного практического эксперимента, в ходе выполнения которого пять свинцовых образцов шпунтовой сваи типа Ларсен с различной степенью обжатия элементов профиля были прокатаны в формообразующем калибре на стане 300 прокатной лаборатории ДГТУ. Каждый подкат вышел из валков с различной степенью изгиба. Для теоретического исследования был выбран образец № 2, имеющий наибольшую кривизну после прокатки – его значительно изогнуло вниз, по направлению на фланцы. Размеры и параметры валков стана 300, а также форма и размеры образца № 2 показаны на рис. 1, а размеры образца до и после прокатки, а также коэффициенты высотной деформации по стенке $1/\eta_c = h_{c0}/h_{c1}$, и по фланцам $1/\eta_\phi = h_{\phi0}/h_{\phi1}$ соответственно, приведены в табл. 1. На рис. 2 приведено фото второго образца после прокатки.

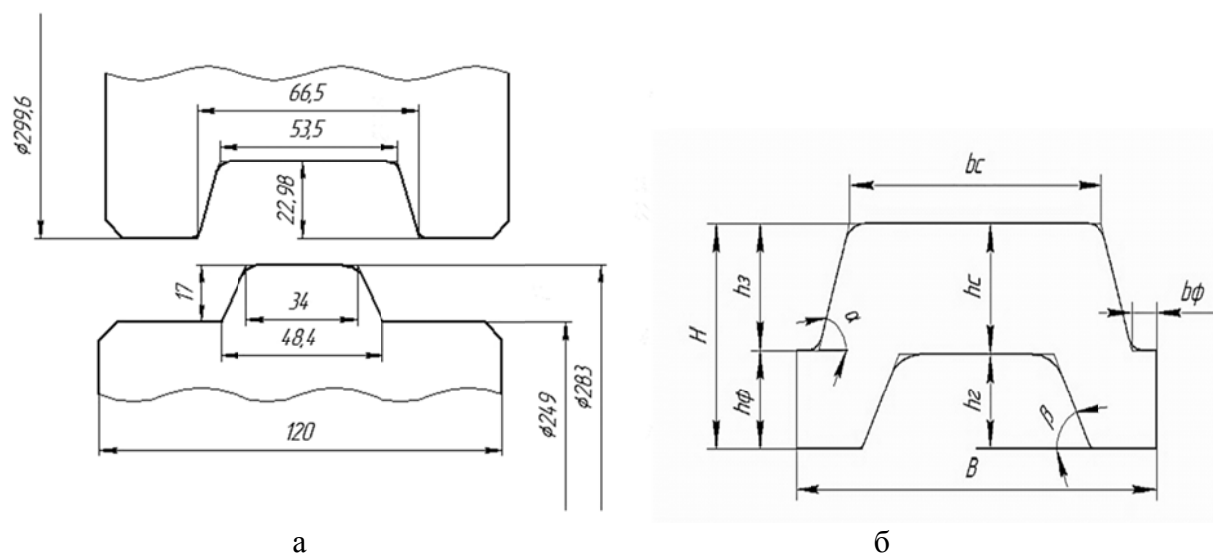


Рис. 1. Размеры и форма:
а – формообразующего калибра; б – заготовки

Таблица 1

Размеры полосы до и после прокатки

$\frac{1}{\eta_{cm}}$	$\frac{1}{\eta_\phi}$	Размеры образца до прокатки						Размеры образца после прокатки					
		h_{c0} , мм	$h_{\phi0}$, мм	h_{c0} , мм	h_{30} , мм	H_0 , мм	B_0 , мм	h_{c1} , мм	$h_{\phi1}$, мм	h_{c1} , мм	h_{31} , мм	H_1 , мм	B_1 , мм
1,333	1,104	34	22	14	26	48	86	25,5	20	17,2	22,3	41,8	88,9

Теоретический расчет был выполнен с помощью программного пакета ESV Deform, который разработан на кафедре ОМД ДГТУ. Этим программным пакетом в качестве математического аппарата для аппроксимации полей скоростей течения металла используется метод

конечных элементов. Общая методика процесса моделирования приведена в работе [11]. Для выполнения расчета выбирались следующие настройки программы: используемый вид конечных элементов – прямоугольная призма с 8 узлами, высота и ширина каждого элемента при этом составила 3,75 мм, а в качестве алгоритма решения был использован метод штрафных функций.



Рис. 2 . Исследуемый образец № 2 после прокатки

В процессе моделирования процесса прокатки профиль шпунтовой сваи также получил изгиб в сторону нижнего вала, что дает возможность поэтапного анализа изгиба полосы на выходе из валков на основании полученного векторного поля скоростей.

Поскольку изгиб полосы связывают с диаметром валков, то изгиб прокатываемого профиля в сторону нижнего вала частично можно объяснить тем, что верхний валок, имеющий больший диаметр, сообщает исследуемому образцу скорость, которая превышает скорость нижнего вала, вследствие чего точки на верхней поверхности полосы движутся быстрее чем на нижней. Однако основным фактором, влияющим на изгиб полосы, является неравномерность обжатия. Поэтому обратим внимание на схему деформации прокатанного образца (рис. 3).

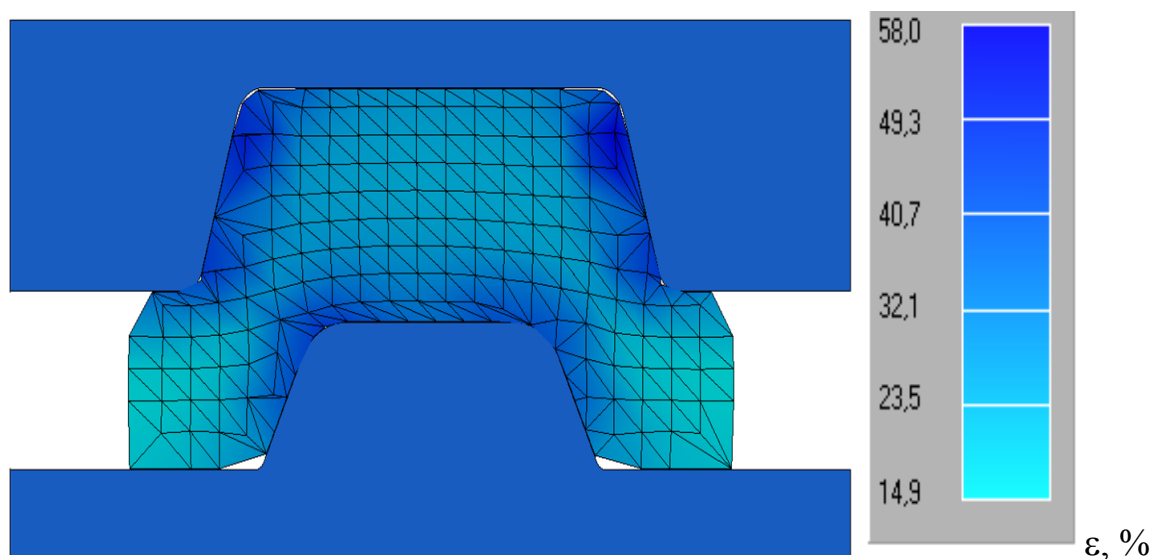


Рис. 3. Схема деформации прокатанного образца

Как видим из рис. 3, наибольшую степень деформации получил наклонный участок верхнего ручья (до 58 %). Также имеются высокие показатели деформации в местах, обжимаемых горизонтальным участком гребня нижнего ручья – до 50 %, а также наклонной

частью гребня этого валка (до 41 %). Фланцы получают значительно меньшее обжатие. Степень деформации здесь не превышает 32 % верхним ручьем по двум верхним кромкам. Остальные участки профиля получили суммарную степень деформации до 30 %.

На практике для расчета среднего относительного обжатия пользуются таким выражением [3]:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где F_0 и F_1 – площади поперечного сечения раската до и после прокатки соответственно, мм².

Согласно этой формуле относительное обжатие $\varepsilon_{cp} = 16\%$. При такой незначительной величине относительного обжатия прокатываемого профиля согласно [2] он также должен изгибаться в сторону нижнего валка.

На рис. 4 приведены векторные поля скоростей при прокатке шпунтовой сваи в различных сечениях очага деформации, а также после выхода переднего конца полосы из валков, с помощью которых проанализируем процесс изгиба полосы.

В начальный момент прокатки при входе в очаг деформации (рис. 4, а) наибольший контакт металла с валками происходит со стороны горизонтальных плоскостей нижнего и верхнего валков. При этом векторы скоростей течения металла приблизительно одинаковой величины направлены навстречу друг другу. На этом участке профиль входит в валки и начинает движение по очагу деформации прямолинейно, без изгиба в ту или иную сторону.

При установившемся процессе прокатки в очаге деформации (рис. 4, б) полоса также сохраняет свою прямолинейность, хотя здесь уже можно заметить начало преобладания течения металла со стороны верхнего валка, что способствует дальнейшему изгибу полосы в сторону нижнего валка при выходе из очага деформации. Также здесь можно наблюдать течение металла в замковых элементах профиля. При этом со стороны нижнего ручья металл из замковых элементов втягивается в среднюю часть полосы, стремясь заполнить свободное место верхнего ручья.

На рис. 4, в мы наблюдаем поле скоростей в момент выхода полосы из валков. Течение металла незначительно, наибольшая величина перемещений по-прежнему со стороны горизонтальных участков верхнего и нижнего валков. Происходит утяжка замковых элементов. Продолжает наблюдаться незначительное преобладание течения металла в верхней части полосы в сторону гребня нижнего валка. Это способствует изгибу полосы вниз.

После выхода переднего конца полосы из валков (рис. 4, г) векторное поле скоростей по всему сечению профиля направлено вниз. В результате этого происходит изгиб прокатываемой полосы. То же самое наблюдалось и при прокатке образца на стане 300.

Таким образом, расчетная модель адекватна, и ее можно использовать для исследования течения металла и прямолинейности выхода шпунтового профиля из валков. Дальнейшее изучение механизма и факторов, влияющих на прямолинейность выхода сложных фасонных профилей из валков, требует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

В статье выполнено сравнение теоретического и экспериментального исследования прямолинейности выхода из валков профиля шпунтовой сваи корытного типа. На выходе из валков в обоих исследованиях полоса получила изгиб в сторону нижнего валка, что позволяет использовать теоретические расчеты для изучения самого процесса и факторов, влияющих на прямолинейность выхода сложных фасонных профилей из валков. Дальнейшее изучение этих явлений требует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

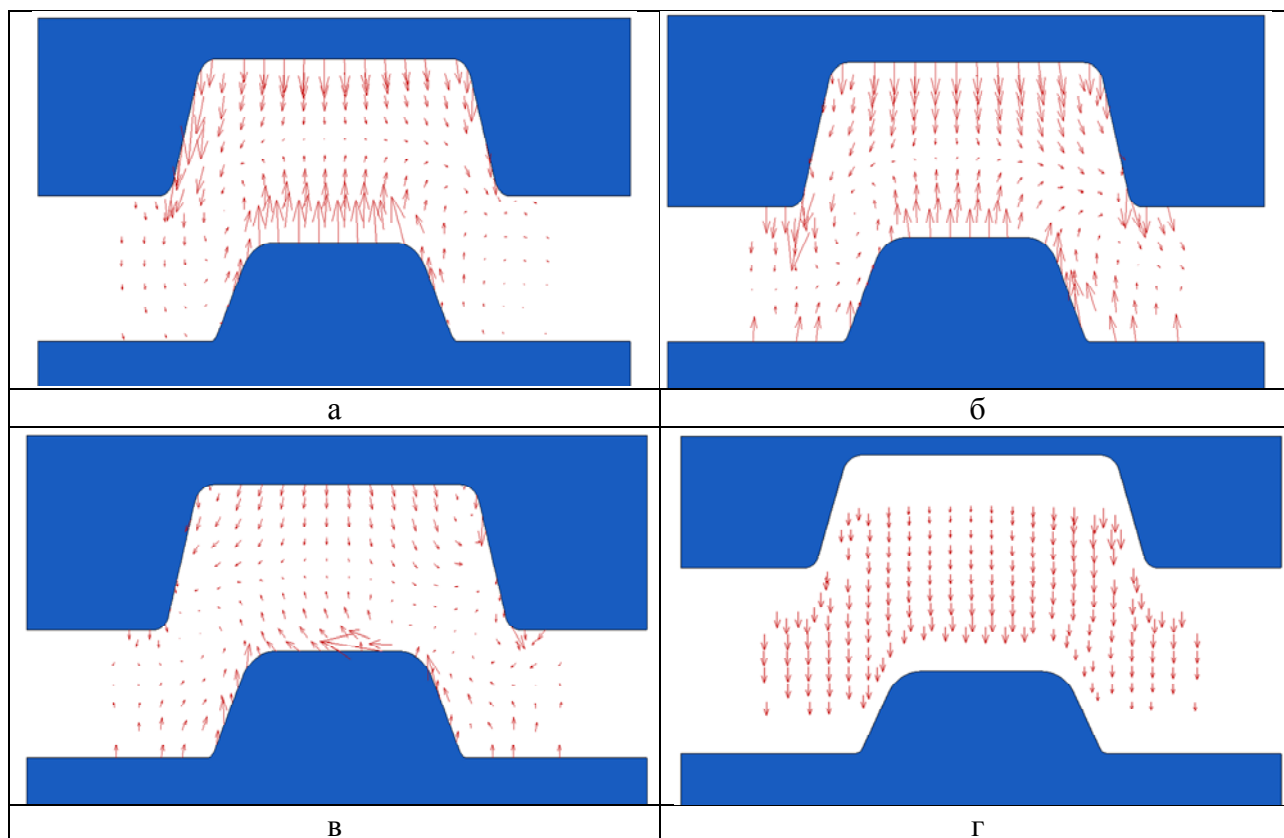


Рис.4 – Векторные поля скоростей течения металла:

а – в момент захвата полосы валками; б – при установившемся процессе прокатки; в – момент выхода из валков; г – после выхода переднего конца полосы из валков

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илюкович Б. М. *Прокатка и калибровка : справочник в 6 т 2004. Т.5. Калибровка швеллерообразных и корытообразных профилей* / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, В. П. Капелюшный. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-вал», – 2004. – 481 с.
2. Данченко В. М. *Теорія процесів обробки металів тиском : підручник* / В. М. Данченко, В. О. Гринкевич, О. М. Головка. – Дніпропетровськ : Пороги, 2008. – 370 с.
3. Грудев А. П. *Технология прокатного производства : учебник для ВУЗов* / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : «Металлургия», 1994. – 656 с.
4. Чекмарев А. П. *Теория продольной прокатки* / А. П. Чекмарев, А. А. Нефедов, В. А. Николаев. – Харьков : Издательство Харьковского ордена трудового красного знамени государственного университета им. А. М. Горького, 1965. – 212 с.
5. Илюкович Б. М. *Прокатка и калибровка: справочник в 6 т. Т.1: Основы теории калибровки. Калибровка блюмов и заготовки, кругов и шестигранников, квадратной стали, проволоки и арматуры* / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-вал». 2002. – 506 с.
6. Тарновский И. Я. *Элементы теории прокатки сложных профилей* / И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов, Б. М. Илюкович. – М. : «Металлургия», 1972. – 352 с.
7. Чекмарев А. П. *Калибровка прокатных валков: учебное пособие для ВУЗов* / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – М. : «Металлургия», 1971. – 512 с.
8. Огинский И. К. *Развитие теории сортовой прокатки и разработка технологических процессов производства профилей на основе многовалковых калибров : диссертация на соискание ученой степени доктор технических наук : 05.03.05 / Огинский Иосиф Кузьмич. – Днепропетровск, 2012. – 423 с.*
9. Еришов С. В. *Закономерности формоизменения металла при прокатке фасонной полосы в черновом шпунтовом калибре без обжатия замковых элементов* / С. В. Еришов, С. Н. Мельник, В. В. Мосьпан, С. Ю. Гаврилин // *Научно-технический журнал «Технологические системы»*. – Киев, 2012.
10. Мельник С. Н. *Развитие метода расчета калибровки валков для прокатки крупных шпунтовых профилей: диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук : 05.03.05 / Мельник Сергей Николаевич. – Днепродзержинск, 2007. – 266 с.*
11. *Теоретические основы обработки металлов давлением. В 2 т. Том 2.* / Б. М. Илюкович, А. П. Огурцов, Н. Е. Нехаев, С. В. Еришов. – Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2002. – 485 с.

REFERENCES

1. Iljukovich B. M. *Prokatka i kalibrovka : spravochnik v 6 t 2004. T.5. Kalibrovka shveleroobraznyh i korytoobraznyh profilej* / B. M. Iljukovich, N. E. Nehaev, V. P. Kapeljushnyj. – Dnepropetrovsk : RVA «Dnipro-val», – 2004. – 481 s.
2. Danchenko V. M. *Teorija procesiv obrobki metaliv tiskom : pidruchnik* / V. M. Danchenko, V. O. Grinkevich, O. M. Golovko. – Dnepropetrovs'k : Porogi, 2008. – 370 s.
3. Grudev A. P. *Tehnologija prokatnogo proizvodstva : uchebnik dlja VUZov* / A. P. Grudev, L. F. Mashkin, M. I. Hanin. – M. : «Metallurgija», 1994. – 656 s.
4. Chekmarev A. P. *Teorija prodol'noj prokatki* / A. P. Chekmarev, A. A. Nefedov, V. A. Nikolaev. – Har'kov : Izdatel'stvo Har'kovskogo ordena trudovogo krasnogo znameni gosudarstvennogo universiteta im. A. M. Gor'kogo, 1965. – 212 s.
5. Iljukovich B. M. *Prokatka i kalibrovka: spravochnik v 6 t. T.I: Osnovy teorii kalibrovki. Kalibrovka bljumov i zagotovki, krugov i shestigrannikov, kvadratnoj stali, provoloki i armatury* / B. M. Iljukovich, N. E. Nehaev, S. E. Merkur'ev. – Dnepropetrovsk : RVA «Dnipro-val». 2002. – 506 s.
6. Tarnovskij I. Ja. *Jelementy teorii prokatki slozhnyh profilej* / I. Ja. Tarnovskij, A. N. Skoro-hodov, B. M. Iljukovich. – M. : «Metallurgija», 1972. – 352 s.
7. Chekmarev A. P. *Kalibrovka prokatnyh valkov: uchebnoe posobie dlja VUZov* / A. P. Chekmarev, M. S. Mut'ev, R. A. Mashkovcev. – M. : «Metallurgija», 1971. – 512 s.
8. Oginskij I. K. *Razvitie teorii sortovoj prokatki i razrabotka tehnologicheskikh processov proizvodstva profilej na osnove mnogovalkovykh kalibrov : dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktor tehniceskikh nauk : 05.03.05 / Oginskij Iosif Kuz'mich.* – Dnepropetrovsk, 2012. – 423 s.
9. Ershov S. V. *Zakonomernosti formoizmenenija metalla pri prokatke fasonnoj polosy v chernomom shpuntovom kalibre bez obzhatija zamkovykh jelementov* / S. V. Ershov, S. N. Mel'nik, V. V. Mos'pan, S. Ju. Gavrilin // *Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Tehnologicheskie sistemy».* – Kiev, 2012.
10. Mel'nik S. N. *Razvitie metoda rascheta kalibrovki valkov dlja prokatki krupnyh shpuntovyh profilej: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidat tehniceskikh nauk : 05.03.05 / Mel'nik Sergej Nikolaevich.* – Dneprodzerzhinsk, 2007. – 266 s.
11. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem. V 2 t. Tom 2.* / B. M. Iljukovich, A. P. Ogurcov, N. E. Nehaev, S. V. Ershov. – Dnepropetrovsk : RIA «Dnepro-VAL», 2002. – 485 s.

Ершов С. В.	– д-р техн. наук, проф. ДГТУ
Мельник С. Н.	– канд. техн. наук, гл. калибровщик ПАО «ДМКД»
Самохвал В. М.	– канд. техн. наук, доц. ДГТУ
Кравченко Е. А.	– аспирант ДГТУ

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепро-дзержинск.

ПАО «ДМКД» – Публичное акционерное общество «Днепровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского».

E-mail: katarina088@gmail.com