

Н.С.Добринский и др. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с. 5. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А.И.Половинкин, Н.К.Бобков, Г.Я.Буш и др. – М.: Радио и связь, 1981. – 344 с.

Bibliography (transliterated) 1. Zalessky W.I. Oborudovanie kuznechno-pressowych zechov. – Moscow: Vysshaja schkola. 1964. – 599 p. 2. Zimin A.I. Machinery and автоматы of Kuznechno-shtampovochного proizvodstva: Chastj 1. Moloty.. – Moscow: Mashgiz, 1953. – 459 p. 3. Shtampy dlja goryachego deformirovanija metallov./Pod red.prof. M.A.Tylkina.. – Moscow: Vysshaja schkola. 1977. – 496 p. 4. Kuznechno-shtampovochное oborudovanie: Uchebnik dlja machinostroitelnyh vuzov A.N.Banketov i dr.. – 2-е изд, – Moscow: Machinostroenie. 1982. – 576 p. 5. Avtomatizatsija poiskovogo konstruirovaniija (iskusstvennyj intellect v maschinnom proektirovanii) / A.I.Polovinkin i dr. – Moscow: Radio i svjaz, 1981. – 344 p.

Надійшла (received) 29.11.2014

УДК 621.771.01

С. В. ЕРШОВ, докт. техн. наук, проф., ДГТУ;
С. Н. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук, гл. калибровщик, ПАО «ДМКД»;
К. Г. ГЕЙМУР, и. о. начальника сортопрокатного цеха, ПАО «ДМКД»;
Е. А. КРАВЧЕНКО, аспирант, ДГТУ, Днепродзержинск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ШВЕЛЛЕРА

Несмотря на большое количество экспериментальных исследований швеллеров, закономерности поведения металла при прокатке в калибрах швеллерной формы изучены недостаточно. Изложены результаты сопоставления данных экспериментального и теоретического исследования деформированного состояния швеллера при прокатке в 9 клетки среднесортного стана 350 ПАО «ДМКД». Рассмотрено и проанализировано формоизменение металла в различных сечениях раската. Установлено наличие значительной неравномерности распределения уширения и вытяжки в очаге деформации, установлены закономерности их распределения.

Ключевые слова: деформация, фланцевые профили, швеллер, калибр, течение металла.

Введение. Профили, оси отдельных элементов которых расположены под некоторым углом (чаще всего 90°) к соединяющей их части, называются фланцевыми [1]. К таким профилям относятся балки, швеллеры, рельсы, тавровые профили, колонные балки и некоторые другие [2]. Форма этих профилей значительно отличается от формы заготовки, поэтому их невозможно получить путем применения равномерного обжатия раската [3]. К калибровке фланцевых профилей предъявляются высокие требования. От её совершенствования во многом зависит производительность прокатных станов, срок службы оборудования, а также качество и себестоимость продукции.

Анализ последних исследований и литературы. Швеллеры прокатывают на рельсобалочных и сортовых станах различного типа, в

зависимости от размера швеллера, особенностей конструкции профиля и требуемой производительности [4].

Особенность прокатки любого фланцевого профиля заключается в том, что его невозможно получить из прямоугольной заготовки или слитка, используя равномерное обжатие, как при прокатке простых профилей. Также к особенностям относятся наличие боковых обжатий в отдельных частях калибра. Однако при правильной и рациональной калибровке неравномерная деформация, неизбежная при прокатке фланцевых профилей, осуществляется только в первых проходах, когда металл имеет более высокую температуру и пластичность, чем в последующих калибрах. В остальных проходах стараются применять равномерные обжатия, обеспечивающие равномерность вытяжек всех элементов профиля. Соблюдая эти условия, можно получить конечный профиль правильной формы и без значительных внутренних напряжений при минимальном расходе энергии [2].

Теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния при прокатке швеллеров проводились разными учеными [5–11]. В этих работах основное внимание уделялось установлению общих закономерностей деформированного состояния с получением формул расчета конечного формоизменения.

Теоретические исследования, проведенные ранее, из-за сложностей построения математических моделей с использованием метода Ритца, не позволяли учесть реальную форму заготовки и калибра. Это, в свою очередь, не позволило точно смоделировать видоизменение потоков металла внутри очага деформации.

На общеинтегральные показатели деформированного состояния это влияет слабо, а вот на напряженное состояние влияние значительно, поскольку хорошо известно, что малейшее изменение в схеме течения металла может привести даже к смене знака напряжений.

В настоящее время существует возможность более точного, чем ранее, учета формы инструмента и заготовки при теоретическом изучении процесса прокатки. Это открывает новые перспективы в изучении теории процессов, происходящих в очаге деформации. Именно эта теория в последующем даёт возможность создания строго контролируемых и управляемых технологических процессов.

Известно, что рациональная конструкция калибров и выбор оптимальных режимов деформации, улучшение качества продукции невозможны без учета деформированного состояния металла при прокатке и знаний о его течении в очаге деформации. Не взирая на большое количество ранее проведенных исследований формоизменения металла при прокатке в калибрах, вопросы

поведения металла при прокатке сложных фасонных профилей остаются недостаточно изученными, что связано с многофакторностью сложных процессов, протекающих в очаге деформации, а также непрерывным развитием технологии производства и теории прокатки. В связи со всем выше изложенным все чаще применяются компьютерные технологии, позволяющие исследовать сложные случаи прокатки.

Цель исследования, постановка проблемы. Целью данной работы является: изучение формоизменения металла в неупрощенном очаге деформации; сопоставление производственных экспериментальных и теоретических картин деформированного состояния металла при прокатке в швеллерном калибре; объяснение сложных явлений при прокатке швеллеров.

Материалы исследований. Для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния при прокатке швеллера были отобраны недокаты со стана 350 ПАО «ДМКД». Исследуемый недокат взят из девятой клетки. На рис. 1 представлены размеры выбранного калибра и заготовки.

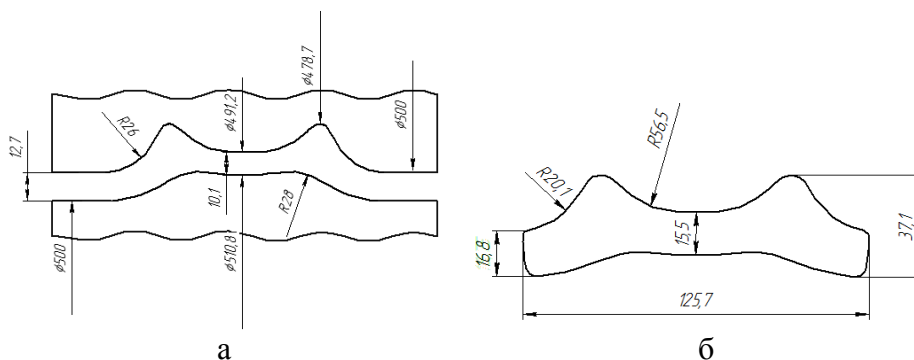


Рис. 1 – Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния при прокатке швеллера: а – размеры формообразующего калибра; б – форма и размеры заготовки

Для вычерчивания сечений раската по длине очага деформации без разрушения профиля на кафедре ОМД ДГТУ был изготовлен профилограф. Полученные очертания были отсканированы и выполнены в электронном виде. Всего по длине очага деформации – 72 мм, было получено 13 сечений, расстояние между которыми составило 6 мм.

При выполнении расчетов исследуемый раскат был поделен на элементы таким образом, как это делают при расчёте калибровки валков для прокатки швеллера (см. рис. 2).

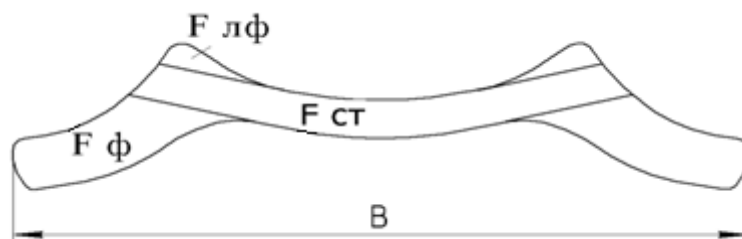


Рис. 2 – Схема разбивки раската на участки и расстановки размеров

Для исследования деформированного состояния были вычислены общие коэффициенты вытяжки по участкам раската и коэффициенты уширения в каждом из исследуемых сечений по следующим формулам:

$$\lambda_i = \frac{F_0}{F_i}, \quad (1)$$

где λ_i – общий коэффициент вытяжки на исследуемом участке;

F_0 – начальная площадь раската, мм²;

F_i – площадь сечения исследуемого участка, мм².

$$\beta_i = \frac{B_i}{B_0}, \quad (2)$$

где β_i – коэффициент уширения в исследуемом сечении;

B_i – ширина раската в сечении, мм;

B_0 – начальная ширина раската, мм.

Площади отдельных элементов раската по сечениям вычислялись в программе КОМПАС-3D.

Теоретическое исследование выполнялось с использованием программного пакета ESV Deform, разработанного на кафедре ОМД ДГТУ, который в качестве математического аппарат использует метод конечных элементов и вариационный принцип механики сплошных сред. Для расчета методом штрафных функций используется уравнение:

$$\delta \left[\frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau v_\tau dS + t_1 \int_V \varepsilon_0^2 dV + t_2 \int_S (v_n - \omega_n)^2 dS \right] = 0, \quad (3)$$

где μ – условная вязкость металла;

H – интенсивность скоростей деформации сдвига;

σ_τ и v_τ – полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности инструмента S ;

t_1 – штрафная константа на невыполнение условия несжимаемости;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\xi_x + \xi_y + \xi_z)$ – скорость относительного изменения объема;

t_2 – штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости;

v_n – проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке;

ω_n – проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке.

С общей методикой моделирования можно ознакомиться в работе [12].

Во время теоретического моделирования процесса прокатки использовались следующие исходные данные: была использована тетраэдральная сетка, длина каждой стороны треугольника составила 6 мм; диаметры валков по буртам – 500 мм; скорость прокатки – 5 м/с; температура прокатки – 1050°C.

Результаты исследования. В ходе экспериментального исследования деформированного состояния металла по данным измерения размеров сечений раската вдоль очага деформации были построены графики распределения вытяжки и уширения по длине очага деформации (см. рис.3, 4).

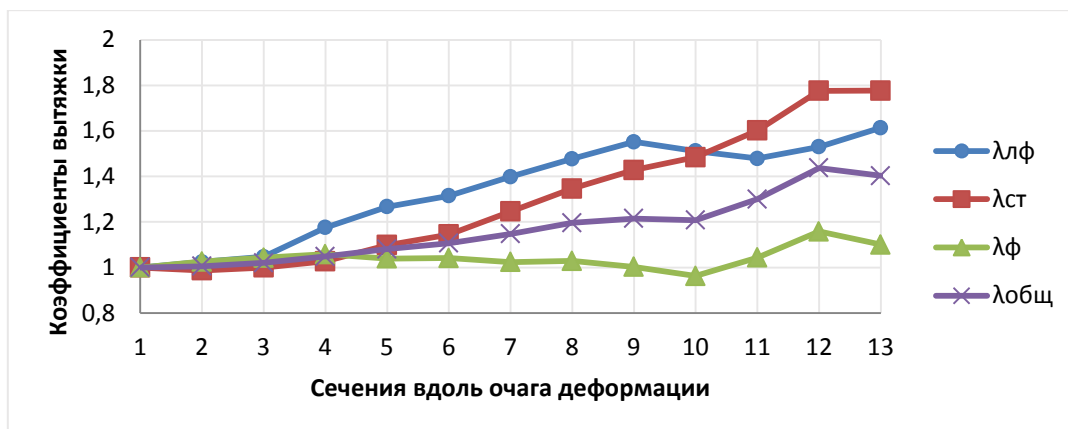


Рис. 3 – График распределения вытяжки по элементам раската вдоль очага деформации



Рис. 4 – График распределения уширения по длине очага деформации

Как видим, вытяжка по элементам раската в процессе прокатки распределяется неравномерно. В начальный момент наибольшее удлинение получают ложные фланцы, при этом наблюдаются участки с утяжкой фланцев. После 4 участка начинает равномерно возрастать вытяжка стенки. Наименьшее значение имеет вытяжка по фланцам. Удлинение по фланцам уменьшается на

участках возрастания уширения (участки 8–10) и наоборот – вытяжка возрастает на участках, где наблюдается утяжка фланцев по ширине (участки 10–12). Коэффициент вытяжки фланцев меньше, чем коэффициенты вытяжки ложных фланцев и стенки.

Уширение изменяется сложным образом. Его общая величина составляет 1 мм. До пятого сечения наблюдается равномерная утяжка по ширине профиля. Затем раскат начинает уширяться – когда все его части вступают в контакт с валками. При этом на рис. 3 мы наблюдаем уменьшение вытяжки по фланцам. Пика уширение достигает в 10 сечении, но уже после выхода раската из очага деформации, в 12 сечении, снова наблюдается утяжка фланцев по ширине. Когда в 13 сечении уширение возрастает (см. рис. 3), на графике мы видим незначительное уменьшение значения общего коэффициента вытяжки.

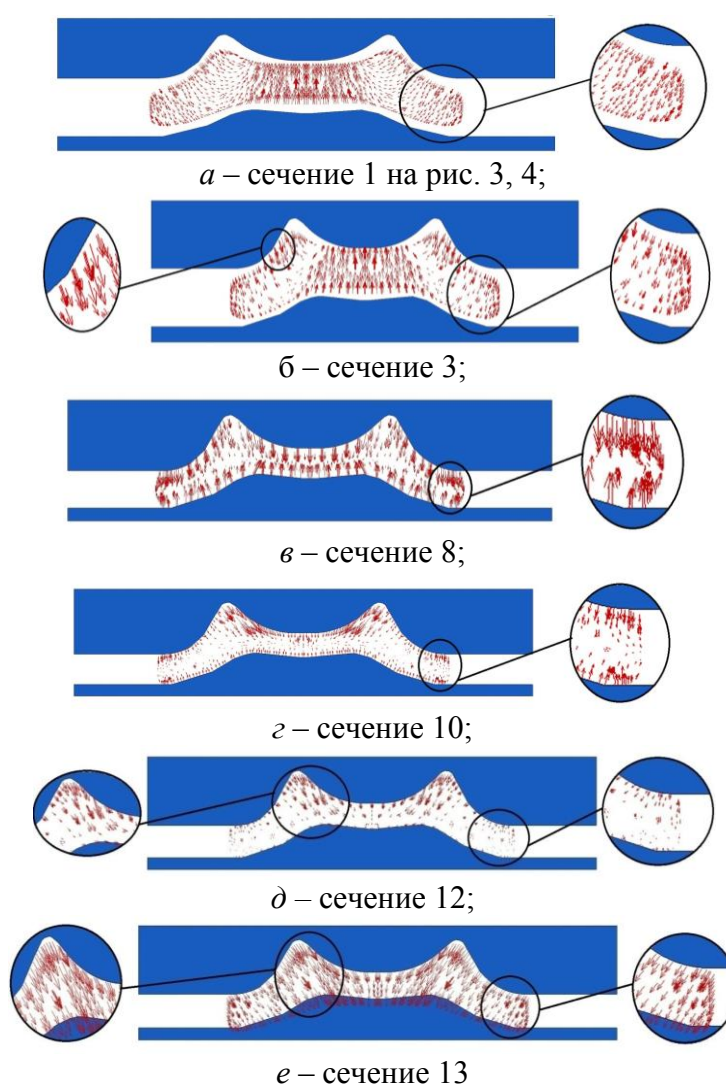


Рис. 5 – Векторное поле скоростей при прокатке швеллера

В процессе теоретического моделирования деформированного состояния профиля также наблюдается утяжка раската по ширине. На рис. 5, *a* наблюдаем

сечение раската за 10 мм до касания металла с валками. Видим, что раскат начинает утягиваться по ширине, о чем свидетельствует направление векторов поля скоростей. Объяснить наблюдаемое явление можно тем, что раскат начинает обжиматься в области стенки и наружной стороны боковых граней ложных фланцев, возникают тянущие силы, которые вытягивают профиль в длину и утягивают его по ширине. На рис. 5, б видно, что в момент касания раската с валками описанная картина течения металла сохраняется. Видим, что со стороны нижнего ручья первой начинает обжиматься стенка. Ложные фланцы обжимаются со стороны наружных боковых граней верхнего ручья калибра. В это время фланцы еще не обжимаются. В результате металл фланцев продолжает утягиваться по ширине.

Внутри очага деформации, когда все части раската вступают в контакт с валками, наблюдаем перетекание металла в среднюю часть калибра. Утяжка фланцев уже не происходит, они постепенно начинают уширяться (см. рис. 5, в). На рис. 5, г изображено векторное поле скоростей за 4 мм до выхода за ось валков. Металл продолжает перетекать в среднюю часть калибра, но уже менее интенсивно. Более активное течение металла наблюдается в ложных фланцах. Через 5 мм после выхода за ось валков (см. рис. 5, д) начинается активное выравнивание скоростей продольного течения металла. В результате течение металла во фланцах практически отсутствует, из более обжатых ложных фланцев металл перетекает в стенку. Нижние кромки фланцев смещаются к средней части раската. Разница в течении металла фланцев вдоль нижней и верхней контактных поверхностей объясняется различной формой верхнего и нижнего ручья. А еще через 10 мм (см. рис. 5, е) можно наблюдать, как раскат начинает изгибаться вниз.

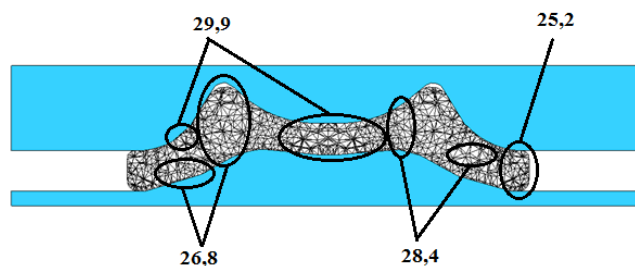


Рис. 6 – Степень деформации раската, %

На рис. 6 приведено распределение степени деформации раската перед выходом из очага деформации. Как видим, наибольшее обжатие получила стенка. Отсюда и высокое значение коэффициента вытяжки на графике (рис. 3). Не смотря на меньшую степень обжатия, ложные фланцы получили значительное удлинение. Это можно связать с тем, что выпуклая форма

верхнего ручья калибра во время обжатия раската способствует интенсивному течению металла к боковым граням. Наименьшее обжатие наблюдается по фланцам, что также объясняет небольшое уширение раската и минимальное значение коэффициента вытяжки.

Среднее отклонение расчетных геометрических параметров от размеров полученного раската составляет 3%. Наибольшая погрешность – 1 мм, наблюдается по высоте ложных фланцев. Погрешность по общей ширине раската составила 0,05 мм. Отклонение по площади раската – 1,1%.

Выводы. В статье выполнено сравнение экспериментального и теоретического исследования деформированного состояния металла при прокатке швеллера в 9 клетки стана 350 ПАО «ДМКД». Сопоставление показало идентичность характера течения металла. Установлены закономерности изменения вытяжки и удлинения по длине очага деформации, позволяющие оценить деформированное состояние и понять причины наблюдаемых на практике явлений.

Список литературы: 1. Бахтинов Б. П. Калибровка прокатных валков / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов – М.: Металлургиздат, 1958. – 784 с. 2. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка: Справочник в 6 т. – Днепропетровск: РИА «Днепро-вал». – 2004 – Т.5: Калибровка швеллерообразных и корытообразных профилей / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, В.П. Капелюшный. – 2004. – 481 с. 3. Коновалов Ю. В. Металлургия: учебное пособие в трех книгах. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ». – 2013. – Т. 3 / Ю. В. Коновалов, А. А. Минаев. – 2013. – 603 с. 4. Грудев А. П. Технология прокатного производства: учебник для ВУЗов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М.: «Металлургия», 1994. – 656 с. 5. Мутьев М. С. Калибровка черновых валков / М. С. Мутьев. – М. «Металлургия», 1964. – 190 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. Старченко Д. И. Исследование характера деформации при прокатке в швеллерных калибрах / Д. И. Старченко, А. В. Сидоренко // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1969. – №8. – С. 95–98. 8. Бергеман Г. В. Особенности применения развернутой калибровки швеллеров при производстве профиля U200 в условиях стана 550 / Г. В. Бергеман, С. М. Антонюк, А. А. Самсоненко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №6. – С. 50–52. 9. Тубольцев А. Г. Опыт и проблемы применения кассет конструкции ДМетИ с неприводными вертикальными валками при прокатке швеллеров / А. Г. Тубольцев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8–9. – С. 226–231. 10. Бергеман Г. В. Новый способ развернутой калибровки валков для прокатки швеллеров с использованием открытого контрольного предчистового калибра / Г. В. Бергеман // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №5. – С. 60–63. 11. Луцкий М. Б. Особенности производства швеллеров в калибрах с переменным изгибом стенки / М. Б. Луцкий, А. А. Чичкан, В. А. Луценко // Черные металлы. – 2012. – №8. – С. 23–28. 12. Илюкович Б.М. Теоретические основы обработки металлов давлением. В 2 т. Том 2. / Б.М. Илюкович, А.П. Огурцов, Н.Е. Нехаев, С.В. Ершов. – Днепропетровск: РИА «Днепро-ВАЛ», 2002. – 485 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bakhtinov B. P. and M. Shternov. *Kalibrovka prokatnikh valkov*. Moscow: Metallurgizdat, 1958. Print. 2. Ilyukovich B. M., N. E. Nehaev and V. P. Kapelyushniy. *Prokatka i kalibrovka*. Vol. 5. *Kalibrovka shvelleroobraznyh i korytnykh profiley*. Dnepropetrovsk: RIA «Dnepro-VAL», 2004. Print. 3. Konovalov Yu. V. and A. A. Minaev. *Metallurgia*. Vol. 3. – Donetsk: «DonNTU», 2013. Print. 4. Grudev A. P, L. F. Mashkin and M. I. Hanin. *Tehnologiya prokatnogo proizvodstva*. Moscow: Metallurgiya, 1994. Print. 5. Mut'ev M. P. *Kalibrovka chernovyh valkov*. Moscow: Metallurgiya, 1964. Print. 6. Tarnovskiy I. Ya., A. N. Skorohodov and B. M. Ilyukovich. *Elementy teorii prokatki slozhnykh profiley*. Moscow: Metellurgia, 1972. Print. 7. Starchenko D. I. and A. V. Sidorenko. «Issledovanie haraktera

deformacii pri prokatke v shvellernih kalibrah». *Izvestiya VUZov: Chernaya Metallurgiya*. No.3. 1969. 95 – 98. Print. **8.** Bergeman G. V., P. M. Antonyuk and A. A. Samsonenko. «Osobennosty primeneniya razvernutoy kalibrovki shvellerov pri proizvodstve profilya U200 v usloviyah stana 550». *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. No. 6. 2013. 50–52. Print. **9.** Tubol'tsev A. G. «Opyt i problemy primeneniya kasset konstrukcii DMetI s neprivodnymi vertikal'nymi valkami pri prokatke shvellerov». *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. No. 8–9. 2002. 226 – 231. Print. **10.** Bergeman G. V. «Noviy sposob razvernutoy kalibrovki valkov dlya prokatki shvellerov s ispol'zovaniem otkrytogo kontrol'nogo predchistovogo kalibra». *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. No. 5. 2007. 60–63. Print. **11.** Lutskiy M. B., A. A. Chichkan and V. A. Lutsenko. «Osobennosty proizvodstva shvellerov v kalibrah s peremennym yzhibom stenky». *Chernye metally*. No. 8. 2012. 23–28. Print. **12.** Ilyukovich B. M. *Teoreticheskie osnovy obrabotky metallov davlenie* Moscow Vol. 2. Dnepropetrovsk: RIA «Dnepro-VAL», 2002. Print.

Поступила (received) 28.10.2014

УДК.621.771.63

А. С. ЗАБАРА, аспирант, НТУ «ХПИ»

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ

Приведено устройство, позволяющее определить энергосиловые параметры процесса и деформированное состояние металла при формообразовании профильных труб. Получаемые результаты обеспечивают оценку основных технологических параметров процесса формообразования и прочностных характеристик проектируемого технологического оборудования. Устройство целесообразно использовать для экспериментальных исследований различных технологических процессов производства гнутых профилей.

Ключевые слова: профильная труба, устройство, формообразование, энергосиловые параметры процесса.

Введение. В Украине производство гнутых профилей замкнутого сечения развито недостаточно [1–3], в литературе отсутствуют данные, позволяющие разработать промышленную технологию их производства, имеет место значительное количество импортной продукции, в связи с чем, работы направленные на создание научных и технологических основ их импортозамещающего производства, являются важными и актуальными.

Отсутствие технологии производства гнутых профилей замкнутого сечения или невозможность точного определения исходных данных по стадиям исследуемых процессов приводит к завышению либо занижению запасов прочности проектируемого технологического оборудования.

Цель исследований, постановка проблемы. Цель настоящей работы является разработка устройство для определения энергосиловых параметров