

УДК 621.771.63: 621.774

Ахлестин А. В.  
Левченко В. Н.  
Ахлестин В. Л.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКЕ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ

Непрерывная валковая формовка гнутых профилей [1–3], а также аналогичная ей формовка трубной заготовки с последующей её сваркой и получением конечного продукта – прямошовных сварных труб [4] – являются одними из наиболее эффективных процессов изготовления металлопродукции. При этом принципиальных отличий как в характере формоизменения полосовой заготовки в валках рабочих клеток профилирующих станков (станков), так и в валках клеток формующей части агрегатов для производства сварных прямошовных труб не имеется. Естественно, что и дефекты, возникающие при изготовлении указанной металлопродукции, во многом также совпадают.

Наиболее распространёнными и в то же время трудно устранимыми являются дефекты формы изделий в продольном направлении (изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскостях, винтообразное скручивание, волнистость кромки и др.). Наличие различных изломов, гофров на подгибаемых элементах и других элементах профилей – недопустимо. Причины образования рассмотренных дефектов, в общем-то, известны. Главное это – интенсификация процесса формовки, то есть применение увеличенных углов подгибки и использование оборудования с недостаточным расстоянием между формующими инструментами смежных клеток стана. Оказывают влияние также ошибки в проектировании технологии и наладке оборудования.

В настоящее время сортамент как гнутых профилей, так и прямошовных сварных труб существенно расширяется преимущественно за счет применения тонкостенных изделий, в том числе с современными покрытиями. Очевидно, что это позволяет повысить эффективность их применения (уменьшается ресурс- и энергопотребление). Вместе с тем известно, что чем меньше толщина металла, тем труднее обеспечить требуемое качество изделия, в том числе в вопросах предупреждения появления вышеуказанных дефектов. И если ранее при разработке технологии профилей известного сортамента можно было использовать накопленный предшественниками многолетний практический опыт работы, то для тонкостенных и особо тонкостенных (0,5 мм и менее) профилей такой возможности нет.

Дальнейшее развитие теории и совершенствование технологических процессов сдерживается недостаточным уровнем знаний о закономерностях контактного взаимодействия, в том числе в рассматриваемых процессах.

В связи с этим представляется целесообразным применение моделирования процесса контактного взаимодействия инструмента и заготовки при валковой формовке профилей и труб с возможным применением известных методов экспериментального определения параметров фактической поверхности контакта (ФПК).

Современные методы определения ФПК взаимодействующих тел подразделяется на пять групп, основанных на: 1) изменении проводимости контакта; 2) адгезии вещества, нанесенного на одну из поверхностей контакта; 3) измерении движения поверхностей с изученными геометрическими параметрами; 4) наблюдении оптических явлений в местах контакта; 5) изменении физических свойств материала на поверхности контакта [5].

Для реальных технологических процессов обработки материалов давлением применимыми могут быть методы из групп 2 и 4. Вместе с тем, экспериментальное определение ФПК связано со значительными трудностями и не всегда возможно. Это объясняется тем, что одни традиционные методы исследований, например, по отпечаткам красителей

и разрушению плёнок, применяются лишь при неподвижном контакте; другие (электроконтактные) требуют сложных устройств и приборов, не дают непрерывной информации, а при использовании заготовки из материалов с органическими покрытиями – вообще неработоспособны.

В настоящее время стремительно развивается математическое моделирование [6] при исследованиях процессов механической обработки материалов. При создании таких моделей необходимо иметь физическое представление об исследуемом объекте, то есть физические (качественные, сущностные) модели должны быть первичными по отношению к математическим (количественным, описательным) моделям [7]. При этом физические модели совсем не обязательно должны быть материальными. Они могут быть идеальными, то есть основанными на мысленной аналогии.

Целью работы является – анализ применяемых в настоящее время моделей для определения параметров фактической поверхности контакта при формовке полосовой заготовки в валках; совершенствование нового экспериментального метода – «Метод прозрачного инструмента».

Публикации по рассматриваемым вопросам весьма малочисленны. В работе [3, с. 205] при аналитическом решении задачи по определению оптимальных углов подгибки полки формируемого швеллера элементом вала с конической поверхностью зона контакта представлена следующим образом. Предполагается, что при подгибке полки происходит как бы её «наматывание» на коническую поверхность вала. При этом сама полка в контактной зоне может быть представлена конической оболочкой (рис. 1).

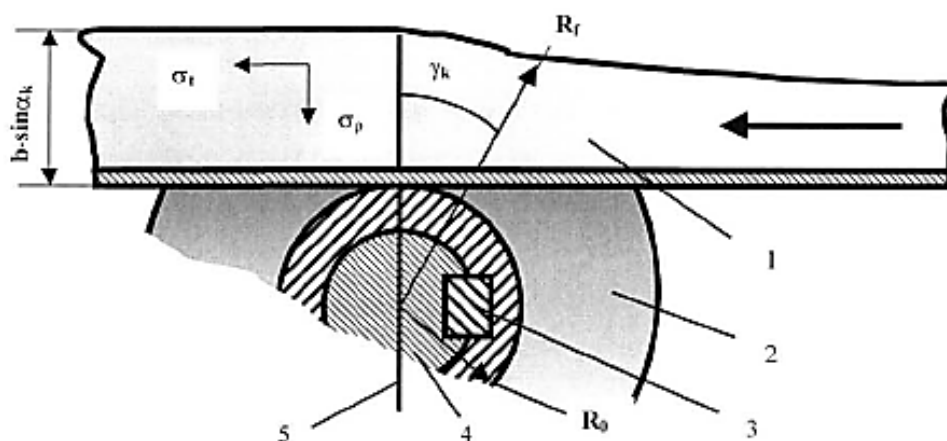


Рис. 1. Контактная зона [3]:

1 – заготовка; 2 – нижний формирующий ролик; 3 – шпонка; 4 – вал станка; 5 – осевая плоскость текущего перехода

Из рисунка видно, что зона контакта (позиция не обозначена) расположена между осевой плоскостью и радиус-вектором, направленным в точку начала контакта формируемого профиля с валком, а также между соответствующими элементами профиля. Если предположить, что образованная таким образом фигура может быть конической оболочкой в контактной зоне, то получается, что сама контактная зона в своих границах может быть фактической поверхностью контакта. Но это – не реально.

В действительности пара валок с конической рабочей поверхностью и относительно плоская полка профиля в рассмотренном случае соприкасаются по несколько изогнутой узкой контактной полосе шириной несколько миллиметров. Эта полоса соединяет точку встречи полки с валком и участком контакта в месте изгиба полки со стенкой профиля, образуя пространственную ФПК. Подобное можно увидеть ниже на рис. 4.

Таким образом, при разработке математической модели (уравнение равновесия для оболочки) её автор не в полной мере представлял себе физический процесс контактного

взаимодействия полки профиля с валком (контактная зона в виде конической оболочки). В результате адекватность модели не подтвердилась, а она сама оказалась первичной по отношению к физической модели, что противоречит [7].

В ОАО «УлНИАТ» (Россия, г. Ульяновск) выполнено моделирование контактных взаимодействий роликового инструмента с полкой профиля швеллерного типа при изготовлении гнутых профилей методом интенсивного деформирования с применением программы динамического анализа LS-Dyna [8]. Представленная на рис. 2 привлекательная картина видимо соответствует физическому представлению авторов исследования о контакте. Результаты расчетов включают геометрию и расположение поверхностей контакта для переходов формовки и контактные давления для заготовок с различной шириной полки (рис. 3). Однако отсутствие исследований по физическому моделированию контакта заготовки и инструмента не позволяет провести оценку степени адекватности результатов моделирования методом конечных элементов, полученных авторами.

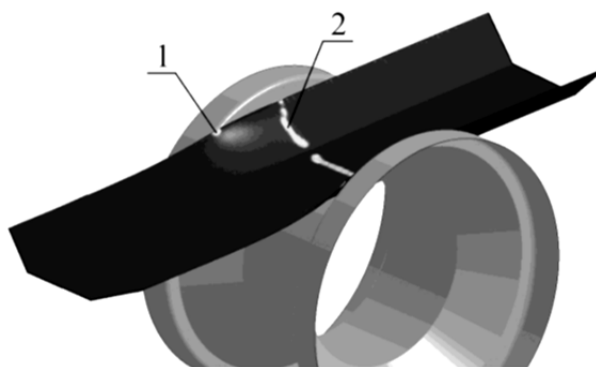


Рис. 2. Зоны контакта полки профиля с нижним роликом (моделирование LS-Dyna) [8]:

1 – контакт с буртом ролика; 2 – контакт с конической частью ролика

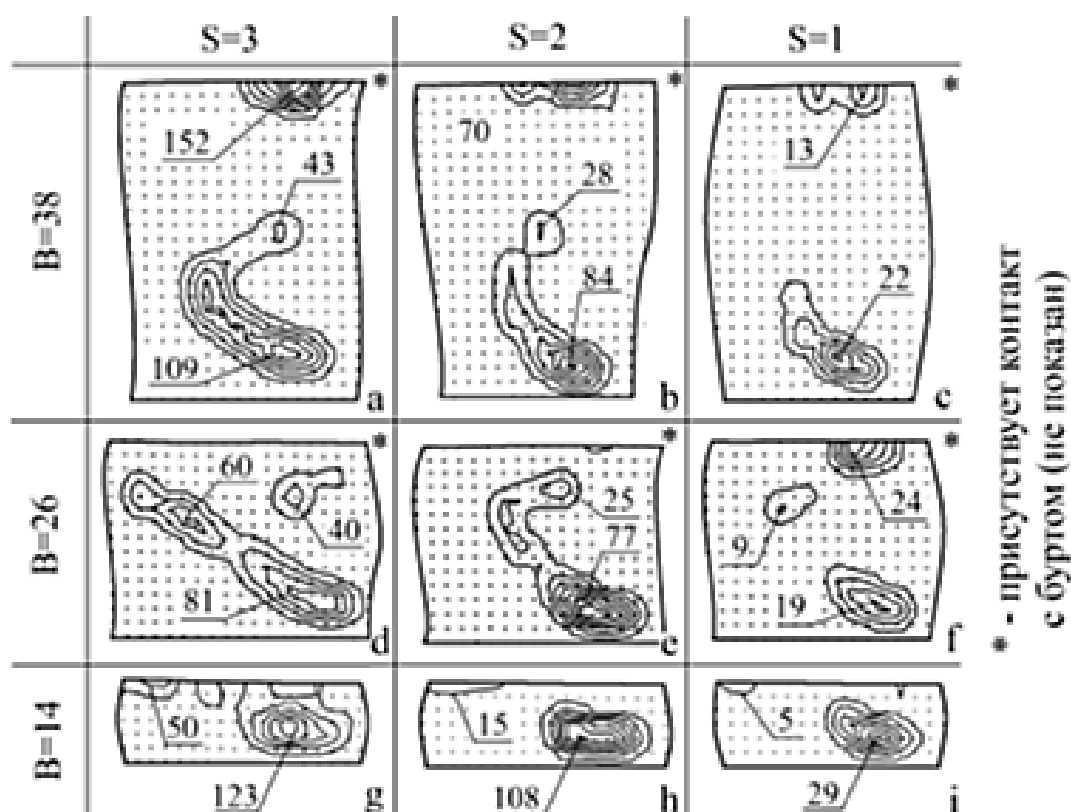


Рис. 3. Зоны контакта между конической частью нижнего ролика и заготовкой на третьем переходе ( $\alpha = 75$ ) и максимальные давления (МПа) для швеллера  $60 \times B \times S$  [8]

Обычно геометрически контактная поверхность заготовки при взаимодействии валкового инструмента с трубной заготовкой моделируется треугольниками. Из работы, выполненной в НИТУ «МИСиС» (Россия, г. Москва), стало известно о разработке новой методики определения «контактных площадей» [4]. Её суть состоит в том, что невращающиеся валки, сведенные с полосой в рабочей клетке трубоформовочного стана, покрывают графитовой пылью. Затем их разводят, подкладывая между каждым валком и полосой белую бумагу. После этого снова сводят валки и разводят их, но уже с полученными на бумаге соответствующими отпечатками. Учитывая проблемы, связанные с покрытием валков, частичным съёмом покрытия из-за относительного скольжения в калибре валков при их сведении-разведении особенно на последующих стадиях формовки, о качестве отпечатков на бумаге можно только догадываться. Тем более что в публикациях о этой методике приводятся не фотографии, а рисунки отпечатков. Но методика – не метод, пусть авторы считают её новой.

Одним из перспективных является определение параметров контактного взаимодействия, в том числе формы и размеров поверхности контакта, при моделировании процессов ОМД с применением инструмента из прозрачного материала, например, оргстекла. Суть этого технического решения может быть описана следующими строками: «Мы видим только то, что видно... Не проникаем в жизни суть! А это так порой обидно... На суть бы изнутри взглянуть!» (Владимир Босый).

В соответствии с [9] методика определения размеров контакта заключается в следующем. Инструмент из прозрачного материала изготавливают с полированными плоскими боковыми поверхностями и непрозрачной (матовой) рабочей поверхностью. При его взаимодействии с заготовкой микронеровности рабочей поверхности сминаются и на ее матовом фоне проявляется изображение контакта (рис. 4). При подсвечивании зоны контакта его поверхность наблюдают и регистрируют под углом к боковой поверхности инструмента. Однако, из-за преломления лучей света размеры видимого контакта в плоскости, перпендикулярной боковой поверхности инструмента, отличаются от фактических размеров. Их определяют с учетом поправочного коэффициента  $K$ .

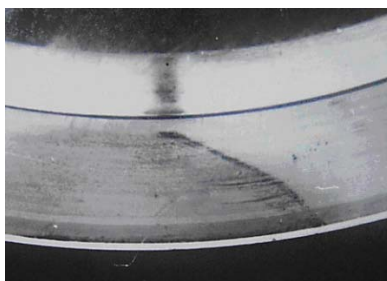


Рис. 4. Вид поверхностей контакта (цилиндрической и конической) при формовке швеллера из алюминиевой полосы толщиной 1,0 мм, окрашенной тёмной нитрокраской, в валках из прозрачного материала

Описанная методика ограничивается возможностью определения размеров фактического контакта на плоских и наклонных участках. На криволинейных же участках однозначно определить величину угла регистрации, а следовательно, и коэффициента  $K$  данным способом не представляется возможным. Поэтому о величине фактического контакта можно судить лишь по величине видимого. Таким образом, данная методика является незавершенной.

Частично задача определения размеров контакта на криволинейных участках решается с помощью устройства [10]. Оно представляет собой инструмент из прозрачного материала, в полости которого непосредственно над зоной контакта установлена поворотная призма. Видимое через нее изображение представляет собою проекцию поверхности контакта на горизонтальную плоскость. Следует отметить, что в большинстве случаев, например для определения усилий, необходимы именно размеры проекции контакта на плоскость, а не его фактическая величина.

Для усовершенствования методики в направлении обеспечения возможности определения размеров контакта на криволинейных участках и повышения точности предложен новый способ [11], согласно которому регистрируют и измеряют контакт под двумя различными углами к боковой поверхности инструмента, получая при этом разные по величине видимые площадки контакта, а размер упомянутой хорды определяют из решения системы линейных уравнений.

При значительной протяженности контакта, когда при возможном любом угле наблюдения в поле зрения попадает лишь его часть, определение величины контакта следует производить по частям с двух сторон инструмента аналогично приведенному выше. При этом в качестве границы между этими частями может служить нанесенная на инструмент или заготовку любым способом (например, резцом) видимая линия, лежащая в плоскости, параллельной боковой поверхности инструмента.

В ряде случаев при относительно малом усилии деформирования, например изгибе тонкостенного металла, поверхность контакта либо отдельные его участки не всегда можно наблюдать на рабочей поверхности инструмента из-за недостаточного давления металла для смятия микронеровностей. Следовательно, получаемая информация о форме и размерах контакта является неполной. Поэтому в соответствии с новым разработанным способом [12] на поверхность заготовки предварительно наносят тонкое эластичное покрытие, например поливинилхлоридную пленку толщиной 0,1...0,3 мм. При взаимодействии инструмента с заготовкой материал покрытия заполняет пространство между микронеровностями, в результате чего все участки контакта четко проявляются на рабочей поверхности инструмента.

Повышение точности определения формы и размеров поверхности контакта приводит соответственно к повышению точности определения других параметров процесса контактного взаимодействия: удельных усилий и сил трения, относительного скольжения, а так же интегральных характеристик: усилия, крутящего момента, работы деформации.

В связи со значительным расширением возможностей, отсутствием аналогов, новизной технических решений и разработкой различных физических моделей статус «методики» изменён на «метод прозрачного инструмента».

Для реализации данного метода авторами спроектирована и изготовлена рабочая клеть для формовки реальных профилей в валках из прозрачного материала (рис. 5).

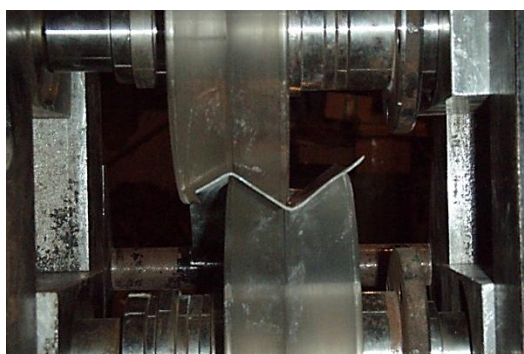


Рис. 5. Экспериментальная клеть для формовки металлических профилей в валках из прозрачного материала

Достоинствами метода являются: достоверность, простота, наглядность, возможность получения информации в динамике процесса, в том числе нестационарного. К ее недостаткам следует отнести некоторое завышение результатов измерений, особенно относительно небольших участков контакта, из-за различия величин модулей упругости материала модели и натуре.

Метод может быть использован при моделировании любых процессов ОМД. Авторами клеть применяется для исследования процессов холодной штамповки, формовки гнутых профилей и труб, прокатки рельсов, в том числе с несимметричным профилем. В качестве

примера приведено изображение контакта на фоне поворотной призмы устройства [10], полученное при переформовке трубы в профиль квадратного сечения (рис. 6). Наличие двух площадок контакта свидетельствует о потере устойчивости металла, образующейся при обжатии в универсальном калибре стенки трубы.

Наибольший эффект от использования метода возможен в сочетании ее с другими экспериментальными методами механики деформируемого тела: поляризационно-оптическим, тензометрии, координатных сеток и др. Так, определение поверхности контакта на фотоупругой модели или на её спутнике из оптически неактивного материала позволяет значительно упростить процесс и повысить точность определения контактных напряжений [13].

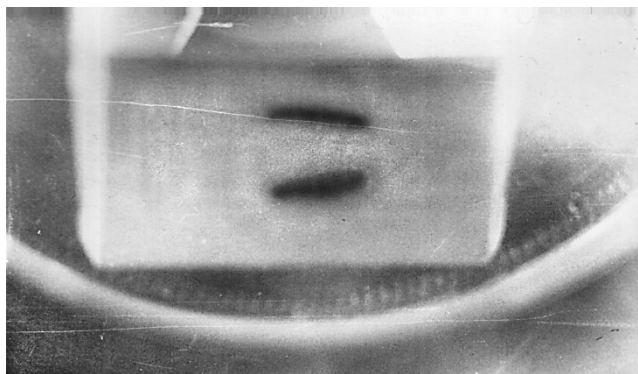


Рис. 6. Вид площадок контакта при переформовке трубы

## ВЫВОДЫ

Дальнейшее развитие теории и совершенствование технологических процессов сдерживается недостаточным уровнем знаний о закономерностях контактного взаимодействия. Разработанный и усовершенствованный авторами метод «прозрачного инструмента» позволяет экспериментально определять форму и размеры действительной поверхности контакта при взаимодействии инструмента и заготовки. Для реализации метода спроектирована и изготовлена рабочая клеть для формовки реальных профилей в валках из прозрачного материала. Метод использован авторами при моделировании процессов формовки профилей и трубных заготовок.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тришевский И. С. *Теоретические основы процесса профилирования* / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М.: Металлургия, 1980. – 287 с.
2. *Roll Forming Handbook* /ed. by G. T. Halmos. Boca Ration : CRC Press, 2006. – 583 p.
3. Филимонов С. В. *Формообразование в роликах профилегибочных станков тонкостенных многоэлементных профилей с элементами жёсткости* : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.09 / Филимонов Сергей Вячеславович. – Самара, 2017. – 475 с.
4. Самусев С. В. *Повышение эффективности производства сварных труб на основе развития теории непрерывного формоизменения и создания способов и устройств комплексных станков ТЭСА* : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.05 : утв. 14.07.2000 / Самусев Сергей Владимирович. – М., 2000. – 437 с.
5. Демкин Н. Б. *Контактирование шероховатых поверхностей* / Н. Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 226 с.
6. Штерензон В. А. *Моделирование технологических процессов* / В. А. Штерензон. – Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 66 с.
7. Нефедов В. И. *К альтернативной физике* / В. И. Нефедов. – Казань : Новое знание, 2007. – 32 с.
8. Илюшкин М. В. *Моделирование контактных взаимодействий роликового инструмента с полкой профиля швеллерного типа при изготовлении гнутых профилей методом интенсивного деформирования* / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов, В. В. Марковцева // *Актуальные проблемы машиностроения : Материалы VI Всерос. конф. 25–27.03.2014* / Известия Самарского научного центра РАН. – Самара, 2014. – том 16, № 1(2). – С. 397–400.
9. Ахлестин В. Л. *Определение границ контактной поверхности валков с заготовкой при моделировании процессов формовки, прокатки* / В. Л. Ахлестин // *Теоретические проблемы прокатного производства : Тезисы докл. III Всесоюз. науч.-техн. конф.* – Днепропетровск : ДМетИ, 1980. – С. 52–53.
10. А. с. 1180687 СССР, МКИ G 01 В 11/24. *Устройство для определения границ поверхности контакта* / Ахлестин В. Л., Желдак А. Д. (СССР). – № 3716179/25-28 ; заявл. 29.03.84 ; опубл. 23.09.85, Бюл. № 35. – 4 с. : ил.

11. Пат. 42488 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 B 11/28. Спосіб визначення розмірів фактичної поверхні контакту взаємодіючих прозорих тіл з плоскими бічними поверхнями / Ахлестін О. В. – № 2001031678 ; заявл. 12.03.2001 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9. – 5 с. : іл.

12. Пат. 60780 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 B 11/28. Спосіб визначення форми і розмірів фактичної поверхні контакту взаємодіючих тіл / Левченко В. М., Ахлестін О. В. – № 2003021496 ; заявл. 20.02.2003 ; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8. – 5 с. : іл.

13. Пат. 47864 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 L 1/24. Поляризаційно-оптичний спосіб визначення напружень / Ахлестін О. В. – № 2001106929 ; заявл. 11.10.2001 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9. – 5 с. : іл.

## REFERENCES

1. Trishevskij I. S. *Teoreticheskie osnovy processa profilirovanija* / I. S. Trishevskij, M. E. Doktorov. – M. : Metallurgija, 1980. – 287 s.

2. *Roll Forming Handbook* /ed. by G. T. Halmos. Boca Ration : CRC Press, 2006. – 583 p.

3. Filimonov S. V. *Formoobrazovanie v rolіkah profіlegіbochnyh stankov tonkostennyh mnogojele-mentnyh profіlej s jelementami zhjostkosti* : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.02.09 / Filimonov Sergej Vjachesla-vovich. – Samara, 2017. – 475 s.

4. Samusev S. V. *Povyshenie jeffektivnosti proizvodstva svarnyh trub na osnove razvitija teorii nepreryvnogo formoizmenenija i sozdanija sposobov i ustrojstv kompleksnyh stanov TJeSA* : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.16.05 : utv. 14.07.2000 / Samusev Sergej Vladimirovich. – M., 2000. – 437 s.

5. Demkin N. B. *Kontaktirovanie sherohovatyh poverhnostej* / N. B. Demkin. – M. : Nauka, 1970. – 226 s.

6. Shterenzon V. A. *Modelirovanie tehnologicheskikh processov* / V. A. Shterenzon. – Ekaterinburg : Izd-vo Ros. gos. prof.-ped. un-ta, 2010. – 66 s.

7. Nefedov V. I. *K al'ternativnoj fizike* / V. I. Nefedov. – Kazan' : Novoe znanie, 2007. – 32 s.

8. Iljushkin M. V. *Modelirovanie kontaktnyh vzaimodejstvij rolіkovogo instrumenta s polkoj profіlja shvel-lernogo tipa pri izgotovlenii gnutyh profіlej metodom intensivnogo deformirovanija* / M. V. Iljushkin, V. I. Filimonov, V. V. Markovceva // Aktual'nye problemy mashinostroenija : Materialy VI Vseros. konf. 25–27.03.2014 / Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. – Samara, 2014. – tom 16, № 1(2). – S. 397–400.

9. Ahlestin V. L. *Opredelenie granic kontaktnoj poverhnosti valkov s zagotovkoj pri modelirova-nii processov formovki, prokatki* / V. L. Ahlestin // Teoreticheskie problemy prokatnogo proizvodstva : Tezisy dokl. III Vsesojuz. nauch.-tehn. konf. – Dnepropetrovsk : DMetI, 1980. – S. 52–53.

10. A. s. 1180687 SSSR, MKI G 01 B 11/24. *Ustrojstvo dlja opredelenija granic poverhnosti kontakta* / Ahlestin V. L., Zheldak A. D. (SSSR). – № 3716179/25-28 ; zajavl. 29.03.84 ; opubl. 23.09.85, Bjul. № 35. – 4 s. : il.

11. Пат. 42488 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 B 11/28. Спосіб визначення розмірів фактичної поверхні контакту взаємодіючих прозорих тіл з плоскими бічними поверхнями / Ахлестін О. В. – № 2001031678 ; заявл. 12.03.2001 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9. – 5 с. : іл.

12. Пат. 60780 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 B 11/28. Спосіб визначення форми і розмірів фактичної поверхні контакту взаємодіючих тіл / Левченко В. М., Ахлестін О. В. – № 2003021496 ; заявл. 20.02.2003 ; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8. – 5 с. : іл.

13. Пат. 47864 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 L 1/24. *Поляризаційно-оптичний спосіб визначення напружень* / Ахлестін О. В. – № 2001106929 ; заявл. 11.10.2001 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9. – 5 с. : іл.

Ахлестін А. В. – директор ООО «Роллформ»;

Левченко В. Н. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доц. НТУ «ХПИ»;

Ахлестін В. Л. – канд. техн. наук, консультант ООО «Роллформ».

ООО «Роллформ» – Общество с ограниченной ответственностью «Роллформ», г. Харьков.

НТУ «ХПИ» – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

E-mail: form2@i.ua; goldangel271@gmail.com; akhlestinvlad@gmail.com.