

УДК 621.771.06.669.721

В.Ф. БАЛАКИН, А.Н. СТЕПАНЕНКО, Д.Ю. ГАРМАШЕВ**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СОПРИКОСНОВЕНИЯ МЕТАЛЛА С ВАЛКАМИ ПРИ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКЕ**

Для повышения точности определения формы и площади контакта трубной заготовки с валком предложена универсальная методика, основанная на математической модели формоизменения металла при поперечно-винтовой прокатке. Указанная математическая модель позволяет пошагово строить контуры очага деформации с учетом закономерностей развития контура прокатываемой гильзы в очаге деформации. Пятно контакта вала с заготовкой представляет собой криволинейную поверхность, существенно меняющуюся в зависимости от траектории движения заготовки в процессе прокатки. Определение площади контактной поверхности металла с валками при поперечно-винтовой прокатке осуществляется с использованием распространенных графических пакетов, таких как QFORM, DEFORM, ANSYS, SOLIDWORK, Компас, AUTOCAD. В предлагаемой методике непрерывно учитывается изменение параметров деформируемого тела (радиуса заготовки, толщины стенки гильзы) относительно оси прокатки с учетом разворота валков.

Использование предлагаемой методики моделирования, обладающей минимальными допущениями, даёт возможность получить фактическое значение площади контакта металла с прокатным инструментом для каждого участка очага деформации, отстоящего друг от друга на величину полушага подачи гильзы. Появляется возможность исследования фактического очага деформации по мере продвижения гильзы с учетом ее формоизменения в очаге деформации.

Площадь контакта металла с валком, полученная путем ее графического построения хорошо совпадает с результатами натурального промышленного эксперимента и на 20 % точнее, чем при расчете с использованием метода, основанного на приближенном описании формы очага деформации эллипсами.

Полученные данные площади контакта являются исходными данными для расчета энергосиловых параметров процесса прошивки (раскатки). Сравнительный анализ показал, что отклонение полученных моделированием значений усилия металла на валок от промышленно-экспериментальных данных не превышает 10 %.

Предложенная методика может быть использован при анализе процессов поперечно-винтовой прокатки: прошивке, раскатке (элонгировании). Полученные результаты позволяют сделать заключение о возможности использования разработанного принципа описания свободного контура раската при разработке компьютерных алгоритмов моделирования поперечно-винтовой прокатки.

Ключевые слова: модель, площадь контакта, гильза, валки, очаг деформации, металл.

В.Ф. БАЛАКИН, О.М. СТЕПАНЕНКО, Д.Ю. ГАРМАШЕВ**УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПЛОЩІ КОНТАКТНОЇ ПОВЕРХНІ КАСАННЯ МЕТАЛУ З ВАЛКАМИ ПРИ ПОПЕРЕЧНО-ГВИНТОВІЙ ПРОКАТЦІ**

Для підвищення точності визначення форми і площі контакту трубної заготовки з валком запропонована універсальна методика, ґрунтована на математичній моделі формо змінення металу при поперечно-гвинтовій прокатки. Вказана математична модель дозволяє покроково будувати контури осередка деформації з урахуванням закономірностей розвитку контуру прокатуваної гільзи у осередку деформації. Пляма контакту вала з заготовкою є криволинійна поверхня, що суттєво змінюється в залежності від траєкторії руху заготовки в процесі прокатки. Визначення площі контактною поверхні металу з валками при поперечно-гвинтовій прокатці здійснюється з використанням поширених графічних пакетів, таких як QFORM, DEFORM, ANSYS, SOLIDWORK, Компас, AUTOCAD.

У запропонованій методиці безперервно враховується змінення параметрів деформуемого тіла (радіуса заготовки, товщини стінки гільзи) відносно осі прокатки з урахуванням розвороту валків.

Використання запропонованої методики моделювання, що має мінімальні допущення, дає змогу отримати фактичне значення площі контакту металу з прокатним інструментом для кожної ділянки осередку деформації, які знаходяться друг від друга на відстані полукроку подачі гільзи. З'являється можливість досліджувати фактичний осередок деформації по мірі руху гільзи з урахуванням її формозмінення в осередку деформації.

Площа контакту металу з валком, отримана шляхом її графічної побудови добре співпадає з результатами натурального промислового експерименту, і на 20 % точніше, ніж при використанні методу заснованого на наближеному описі форми осередку деформації еліпсами. Отримані данні площі контакту металу з валками є вихідними даними для розрахунку енергосилових параметрів процесу прошивки (розкатки). Порівняльний аналіз показав, що відхилення отриманих моделюванням значень зусиль металу на валок від промислово-експериментальних даних не перебільшує 10 %.

Запропонована методика може бути використана при аналізі процесів поперечно-гвинтової прокатки: прошивки, розкатки (елонгванні). Отримані результати дозволяють зробити висновок про можливість використання розробленого принципу опису вільного контуру розкату при розробці комп'ютерних алгоритмів моделювання поперечно-гвинтової прокатки.

Ключові слова: модель, площа контакту, гільза, валки, осередок деформації, метал.

V.F. BALAKIN, A.N. STEPANENKO, D.Y. GARMASHEV**IMPROVED METHOD FOR CALCULATION OF METAL SURFACE CONTACT AREA WITH ROLLS DURING CROSS ROLLING PROCESS**

The universal methodology based on the mathematical model of metal deformation during cross rolling process has been proposed to improve accuracy in determination of shape and area of contact of the pipe billet with a roll. The indicated mathematical model allows stepwise building of deformation zones contour with due consideration of consistency in development of the rolled shell contour in deformation zone. Area of the roll contact with the shell has a form of curved surface significantly changing as a function of the shell movement path during the rolling process. Determination of the contact area of metal surface with the rolls during cross rolling process is fulfilled with the use of widespread graphic packages like QFORM, DEFORM, ANSYS, SOLIDWORK, Compass, AUTOCAD. The proposed methodology takes care on a continuous basis of changing parameters of a deformable body (radius of billet, shell wall thickness) w.r.t. rolling axis with due consideration of a roll turning.

The use of proposed simulation method featuring minimum assumptions allows receipt of actual value of the contact area of metal with a rolling tool for each deformation area spaced from each other at a half step of the shell feed. It becomes possible to study actual deformation zone while the shell moves with due consideration of its deformation in the deformation zone.

The contact area of the metal with the roll obtained from its graphic construction well coincides with results of full-scale industrial experiment and it is more accurate by 20 % as compared with calculation using method based on approximated description of deformation zone shape by ellipses.

The contact area data obtained serve as an input for calculation of energy parameters for piercing process (rolling-off). Comparative analysis showed that deviation of values of the metal force on the roll generated by simulation is not more than 10 % as against experimental data.

The proposed methodology can be used for analyzing cross rolling processes: piercing, expansion (elongation). The results obtained allow us to come to conclusion on possibility of using the developed principle describing free rolling-off contour during development of computer algorithms for simulation of cross rolling process.

Keywords: model, area of contact, shell, rolls, deformation zone, metal, contact patch.

Введение. Учитывая потребности рынка металлопродукции, одной из актуальных задач трубного производства является расширение сортамента и повышение качества труб.

В Украине при слабом инвестиционном климате сохраняется ещё большая доля необновленных промышленных мощностей по производству бесшовных горячедеформированных труб. Эти производства требуют совершенствования технологии и модернизации оборудования, при этом с наименьшими затратами.

Решение поставленных задач невозможно без разработки методов расчета энергосиловых параметров процессов прокатки труб, позволяющих наиболее полно использовать существующее оборудование.

Важнейшим элементом, влияющим на точность расчетов энергосиловых параметров процесса поперечно-винтовой прокатки, является площадь соприкосновения металла с валками.

Анализ опубликованных научных исследований. До настоящего времени площади контакта металла с валками рассчитываются в основном по известной методике, разработанной А.И. Целиковым [1]. Несмотря на широкое применение этого метода, следует отметить некоторые его недостатки. К числу их относятся недостаточная точность и значительная трудоемкость расчета, а также отсутствие аналитической зависимости площади контакта от технологических параметров процесса. Поэтому в работах [2-4] были сделаны попытки уточнить аналитический метод расчета ширины площади контакта с учетом влияния овализации, частных обжатий и так называемого наката.

Определить истинную площадь контактной поверхности металла с валками существующими методами не представлялось возможным, поэтому при расчете ее заменяют на более простую, ограниченную ломаными линиями и четвертями эллипсов.

В действительности в косовалковых станах площади поперечных сечений заготовки за полуоборот не остаются постоянными, значительно отличаются друг от друга, что при расчете по известным методикам приводит к значительным неточностям.

Постановка задачи. В настоящей работе предлагается метод расчета контактной площади заготовки с валками станов поперечно-винтовой прокатки с учетом зависимостей контактной площади от различных технологических параметров процесса: калибровки прокатного инструмента, настройки стана, вытяжки, размеров валков, оправки, размеров заготовки и гильзы и других факторов. Для решения поставленной задачи рассматривается общий случай поперечно-винтовой прокатки (стан-элонгатор с бочковидными валками).

Изложение результатов работы. Как известно, очаг деформации станов винтовой прокатки можно представить состоящим из ряда непрерывно

расположенных очагов деформации продольной прокатки на гладкой бочке (рис. 1, а и б), оказывающих воздействие на скорости перемещения металла в осевом и тангенциальном направлениях. После выхода из какого-либо сечения очага деформации с тангенциальной скоростью, определяемой окружной скоростью валков и коэффициентами деформации в этом конкретном сечении, металл за величину полушага гильзы попадает в сечение, скорость которого, как правило, не может обеспечить прием подаваемого в него металла. Вследствие этого происходит повышенное истечение металла в тангенциальном направлении и в результате формируется т.н. овализация профиля.

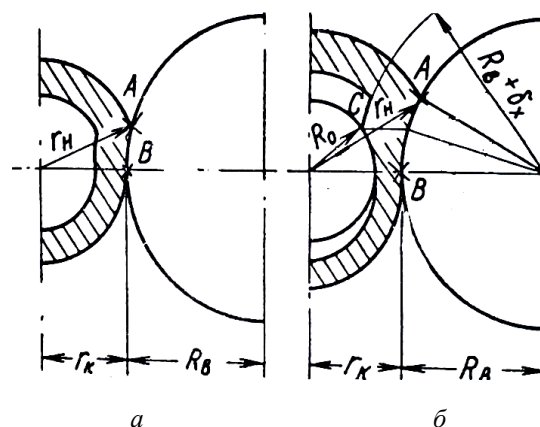
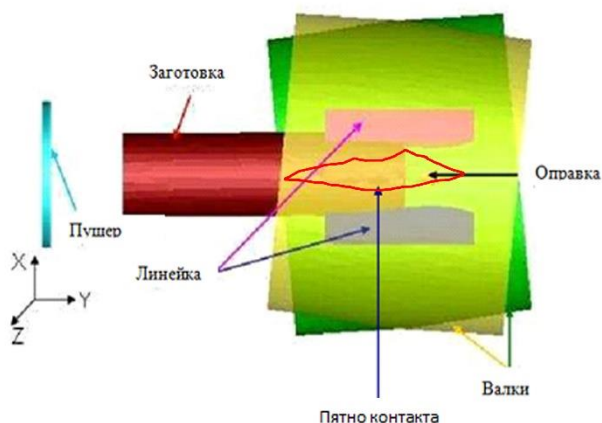


Рис. 1 – Схемы к определению длин дуг контакта металла с инструментом (в поперечном направлении), а – без оправки, б – на оправке: r_n – радиус наката заготовки; r_k – радиус заготовки (гильзы); R_0 – радиус оправки; R_B – радиус вала; $R_B + \delta_x$ – радиус вала плюс величина обжатия за полуоборот гильзы; А, В и С – точки контакта металла с инструментом

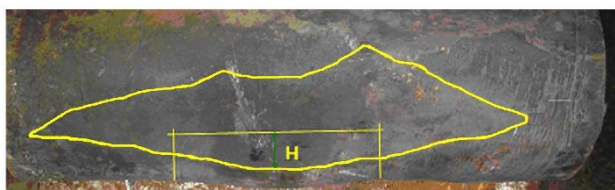
Рассмотрим процесс деформации полого тела в стане-элонгаторе. При прокатке без оправки (рис.1, а) обжатие начинается от точки А, соответствующей пересечению окружности заготовки с окружностью вала, и прекращается в точке В отрыва металла от вала. При прокатке на оправке (рис. 1, б) заготовка начинает деформироваться в точке А. Происходит редуцирование гильзы по диаметру без существенного изменения стенки до момента встречи ее с оправкой в точке С. Далее стенка гильзы обжимается между валком и оправкой.

В реальном процессе элонгирования за счет овализации профиля и явления наката имеет место увеличение площади контакта, которая имеет плавную кривую границу по всей протяженности.

В зоне обжатия наблюдается резкое увеличение ширины контактной поверхности, а в зонах обкатки по стенке и, особенно по диаметру из-за некоторого подъема диаметра трубы наблюдается увеличение длины очага деформации в осевом направлении.



Пятно контакта на модели процесса



Пятно контакта в натуре (торможенная гильза)

Рис. 2 – Изменение площади контакта деформируемого металла с прокатным инструментом по мере продвижения заготовки

Следовательно, пятно поверхности контакта вала с заготовкой представляет собой криволинейную поверхность, существенно меняющуюся в зависимости от траектории движения заготовки в процессе прокатки. Если эту сложную поверхность представить в развернутом виде на плоскости, то она будет иметь вид, изображенный на рис. 3

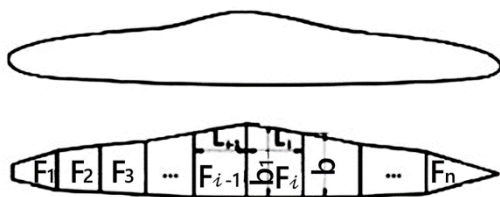


Рис. 3 – Схема к определению площади контактной поверхности вала с заготовкой при раскатке (прошивке): а – пятно контакта; б – аппроксимированное пятно контакта

По мере продвижения заготовки между валками, валками и оправкой от точки начала до конца контакта происходит непрерывное изменение формы поверхности контакта. Так как образованная поверхность является сложной формы, то определение ее площади производится как для пространственной фигуры. В поперечном направлении, контур представляется дугой, изменяемой по мере увеличения обжатия. В продольном – дугой, изменяемой по мере продвижения в осевом направлении. Изменение пятна контакта определяется шагом подачи.

Согласно схемы приведенной на рис. 3, площадь

будет равна сумме площадей трапеций F_i , основаниями которых будут являться длины дуг контакта b_i , а высотами – полушаг подачи L_i .

$$F_i = \frac{b_{i+1} + b_i}{2} \cdot L_i; \quad F = \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

Высота трапеции L_i , протяженность рассматриваемого участка, представляет собой величину, откладываемую в осевом направлении по ходу прокатки и равную величине полушага подачи.

Для определения полушагов подачи, следует рассчитать величину полушага на выходе $L_{\text{вых}}$ из очага деформации:

$$L_{\text{вых}} = 0,5 \cdot \pi \cdot d_z \cdot \text{tg} \beta \frac{\eta_0}{\eta_T}, \quad (2)$$

где d_z – наружный диаметр гильзы;

β – угол подачи;

η_0 и η_T – коэффициенты осевой скорости и тангенциальной скорости соответственно.

Далее, согласно закону сохранения объемов, итерационным методом определяем величины остальных полушагов L_i :

$$L_{\text{вых}} = 0,5 \cdot \pi \cdot d_z \cdot \text{tg} \beta \frac{R_{\Pi} \cdot S_{\Gamma} \cdot \eta_0}{R_i \cdot S_i \cdot \eta_T}, \quad (3)$$

где d_z – наружный диаметр заготовки в i -ом сечении; наружный диаметр гильзы;

R_i – радиус вала в i -ом сечении;

S_{Γ} – площадь поперечного сечения гильзы;

S_i – площадь заготовки в i -ом поперечном сечении.

Рассмотрим на конкретном примере методику расчета площади поверхности контакта вала с заготовкой при раскатке (прошивке) цилиндрической заготовки.

Поверхность (пятно) контакта заготовки с валками по мере внедрения в нее вала фиксируется линиями пересечения вала и заготовки в виде вертикальных сечений соответственно S_1-S_5 (рис.4 а и б).

Путь заготовки в осевом направлении разбивается на необходимое количество частей, равных полушагу подачи, каждая из которых соответствует глубине внедрения $\Delta h_1-\Delta h_5$ вала в заготовку (рис. 4, а и б).

Перемещение вала из точки O в точку 5 разбивается на участки l_1-l_5 (рис. 4, а).

Поперечные сечения плоскости S_1-S_5 (рис.4, б) соответствуют перемещениям заготовки по длинам участков l_1-l_5 , а горизонтальные сечения плоскости K_1-K_5 (рис.4, а) определяют пересечение поверхности заготовки с валком и, следовательно, определяют поверхность контакта вала с деформируемой заготовкой.

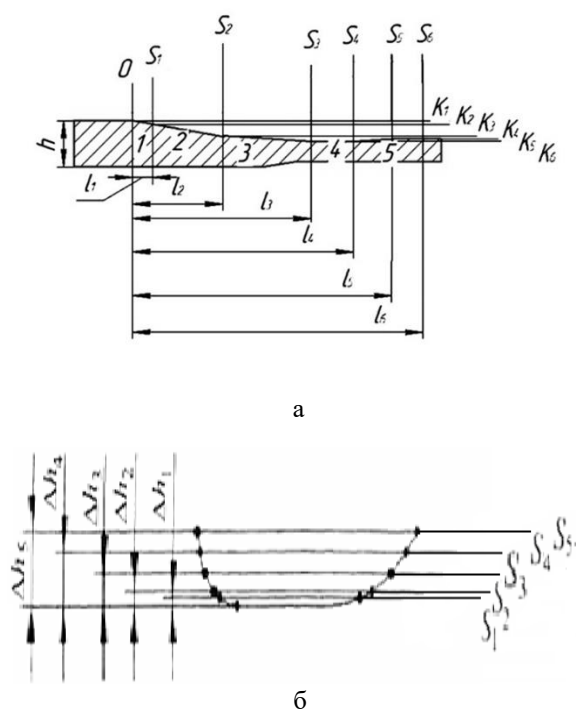


Рис. 4 – Схема перемещения заготовки (гильзы): а – в осевом, б – в радиальных направлениях

По мере продвижения валка в поперечном направлении поверхность пятна контакта с заготовкой увеличивается или уменьшается в зависимости от траектории раскатки и геометрии исходной заготовки (высота профиля заготовки меняется от h_1 до h_5).

Для определения площади поверхности контакта с помощью программного продукта SOLIDWORKS поверхность валка и деформированной заготовки, усеченную плоскостями, рассматриваем в трехмерном виде и вычисляем площадь каждой фигуры образованной пересечением секущих площадей в горизонтальном и вертикальном направлениях (рис.4, а и б). Итоговая площадь контакта будет равна алгебраической сумме площадей всех выделенных элементов, фигур, образованных пересечением вертикальных и горизонтальных плоскостей.

В настоящее время с использованием передовых программных продуктов, таких как QFORM, DEFORM, ANSYS, SOLIDWORK, Компас, AUTOCAD и т.п. предназначенных для твердотельного моделирования появилась возможность эффективно исследовать процесс поперечно-винтовой прокатки.

Использование данной методики моделирования, обладающей минимальным набором допущений, даёт возможность получить фактическое значение площади контакта металла с прокатным инструментом для каждого участка очага деформации отстоящего друг от друга на величину полушага подачи гильзы. Тем самым появляется возможность исследования фактического очага деформации по мере продвижения

гильзы с учетом ее формоизменения в очаге деформации.

Сравнительный анализ показал, что отклонение полученных моделированием значений усилия металла на валок от расчетно-экспериментальных данных не превышает 10 %.

Следовательно, предложенная методика позволяет определить площадь поверхности контакта валка с заготовкой с учетом формоизменения заготовки, применяя встроенные функции используемых для проектирования программных продуктов: Solidworks, Компас – 3D и т.п.

Выводы. Предлагаемая методика может быть использована при предварительном проектировании процесса раскатки заготовки или прошивки с учетом положения валка стана (углы раскатки, подачи, смещение оси) без достаточно громоздких и трудоемких расчетов.

Данная методика может аналогичным способом быть использована и для нахождения площади контакта металла с оправкой или линейкой, как для процесса прошивки, так и для процесса раскатки полых тел.

После определения площади контакта инструмента с деформируемым металлом можно более точно рассчитать энергосиловые параметры процесса прошивки и определить возможности существующего оборудования по расширению сортамента прокатываемых труб.

Список литературы

1. Целиков А.И. Теория расчета усилий при прокатке. М.: Metallurgizdat – 1962. – 250 с.
2. Матвеев Ю.М. Некоторые вопросы теории поперечно-винтовой прокатки. Труды ВНИИМЕТМАШа, 1964. – №12. – С.15–20.
3. Полухин П.И., Голубчик Р.М., Зельдович Л.С. Определение площади соприкосновения металла с валками при прошивке. Сталь, 1961. – №7. – С.1120-1128.
4. Быков Ф.М., Кузнецов Э.М., Могилевкин Ф.Д. Особенности геометрии очага деформации грибовидных прошивных станов. Производство сварных и бесшовных труб. Сб. статей УралНИТИ. – М.: Metallurgizdat, 1963. – Вып. 1. – С. 10–13.
5. Рахманов С.Р., Гармашев Д.Ю., Степаненко А.Н., Донец Д.А. Анализ особенностей процесса винтовой прокатки труб с использованием информационных технологий// Компьютерное моделирование: анализ, управление, оптимизация. – 2017. – № 2 (2). – С. 65–71.

References (transliterated)

1. Tselikov A.I. (1962) *Teoriya rascheta usilij pri prokatke* [Theory of forces calculation during rolling]. Moscow: Metallurgizdat, 250 p.
2. Matveev Yu.M. (1964) *Nekotorye voprosy teorii poperechno-vintovoy prokatki* [Some issues of cross rolling theory]. Proceedings of VNIIMETMASH. No 12, pp. 15-20.
3. Polukhin P.I., Golubchik R.M., Zeldovich L.S. (1961) *Opreделение ploschadi soprikosnoveniya metalla s valkami pri proshivke* [Determination of area of metal contact with rolls during piercing. *Stal* [Steel]. No 7, pp. 1120-1128.
4. Bykov F.M., Kuznetsov E.M., Mogilevkin F.D. (1963) *Osobennosti geometrii ochaga deformatsii gribovidnykh proshivnykh stanov. Proizvodstvo svamyih i besshovnykh trub* [Geometry peculiarities of the deformation zone of cone-roll piercing mills. Production of welded and

seamless pipes]. Collection of articles of UralNITI. Moscow: Metallurgizdat. Vol. 1, pp. 10–13.

5. Rakhmanov S.R., Garmashev D.Yu., Stepanenko A.N., Donets D.A. (2017) Analiz osobennostey protsessa vintovoy prokatki trub s ispolzovaniem informatsionnykh tekhnologiy [Analysis of the

peculiarities of pipe cross rolling process using information technologies]. *Kompyuternye modelyuvannya: analiz, upravlinnya, optymizatsiya*. [Computer modeling: analysis, control, optimization]. No 2 (2), pp. 65–71.

Поступила (received) 20.08.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Балакин Валерий Федорович (Балакін Валерій Федорович, Balakin Valery Fedorovich) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологического проектирования», Национальной Металлургической Академии Украины, Днепро, Украина.

Степаненко Александр Николаевич (Степаненко Олександр Миколайович, Stepanenko Alexander Nikolaevich) – главный инженер. Государственное Предприятие «Украинский государственный институт по проектированию металлургических заводов («УКРГИПРОМЕЗ»), Днепро, Украина;

Гармашев Денис Юрьевич (Гармашев Денис Юрійович, Garmashev Denis Yurievich) – кандидат технических наук, главный специалист, ООО «ИНТЕРПАЙП Нико Тьюб», Никополь, Украина