

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛЬЦЕВОЙ ФОРМОВКЕ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

**В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;*

*ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск*

При вальцевой формовке заготовки для труб большого диаметра вся работа деформации реализуется силами трения, которые передают штрипсу энергию привода через поверхность контактного взаимодействия с валами. Для характерной в процессе формовки специфики контактной границы чисто обработанного и закаленного вала с поверхностью заготовки, покрытой слоем вторичной окалины, в литературе практически отсутствуют данные по коэффициентам трения в таких условиях.

Поскольку активные силы трения определяют ресурс деформационных возможностей процесса без пробуксовки валков относительно штрипса, достоверные данные о силах трения необходимы для расчета технологических режимов и оценки нагрузок на элементы трансмиссии.

В статье представлены экспериментальные материалы по определению коэффициента трения, полученные в условиях, максимально приближенных к условиям формовки трубной заготовки на трехвалковой гибочной машине. Приведены методика проведения эксперимента, описание лабораторной установки с необходимыми средствами измерения. Выполнена оценка влияния основных технологических факторов на величину коэффициента трения.

*Ключевые слова:* вальцевая формовка; коэффициент трения; валки; эксперимент.

Современные системы транспортировки углеводородов представляет собой разветвленную сеть магистральных трубопроводов.

С ростом мирового потребления углеводородного сырья запасы на суше истощаются, и в последние десятилетия поисково-разведочные работы все в большей степени проводятся в акваториях морей и океанов. В последние годы доля «морских» нефти и газа в общем объеме добычи превышает 30 % и в перспективе продолжит расти, что приводит к необходимости реализации проектов трубопроводов с морскими переходами.

Трубы для морских участков трубопроводов, как правило, имеют относительно небольшой диаметр, порядка 600–800 мм, в сочетании с толщиной стенки в пределах от 25 до 40 мм. Это, в первую очередь, связано с высоким внешним давлением, действующим на трубу. Так, к примеру, глубина перехода по дну Черного моря газопровода «Южный поток» достигает 2 км. Отношение диаметра к толщине стенки образует показатель  $D/h$ , который для труб морского сортамента составляет порядка 20–32.

По способу формирования основного периметра труб в современных технологиях применяют пошаговую формовку на гибочных прессах и формовку в вальцах.

Формовка заготовки трубы в вальцах, в отличие от формовки на прессе, обеспечивает равномерную деформацию за счет непрерывности процесса. Конструкция машины проще, с меньшей металлоемкостью, поскольку подача заготовки в

процессе формовки реализуется рабочим инструментом.

При вальцевой формовке имеет место ограничение по усилию формовки при использовании безпорного нажимного вала из-за его прогиба между нажимными устройствами. Этот недостаток компенсируется применением для формовки труб с малым отношением  $D/h$  многоопорного верхнего вала. Другим ограничивающим фактором становится допустимый крутящий момент, приложенный к валкам, который обусловлен прочностными характеристиками элементов привода или величиной фрикционных сил на контакте инструмента с заготовкой.

В очаге деформации при формовке в вальцах (рис. 1) взаимодействие заготовки и инструмента происходит в точках  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

При изгибе в очаге деформации внешние слои заготовки растягиваются, а внутренние – сжимаются. Следовательно, скорости на поверхности штрипса в точках  $A$ ,  $B$  и  $C$  не равны между собой и для внешней поверхности заготовки, с учетом величины деформации  $\varepsilon$ , определяются выражениями:

$$V_A = V_0; \quad (1)$$

$$V_B = V_0(1 - \varepsilon_{\text{внут}}); \quad (2)$$

$$V_C = V_0(1 + \varepsilon_{\text{внеш}} - \varepsilon_{\text{расп}}), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{внут}}$  – максимальная деформация внутренних слоев в полюсе деформации;  $\varepsilon_{\text{внеш}}$  – максимальная деформация внешних слоев в полюсе деформации;  $\varepsilon_{\text{расп}}$  – деформация распруживания.

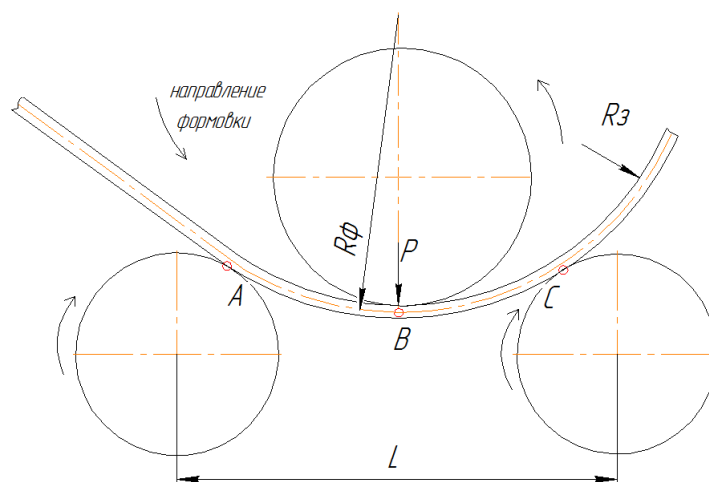


Рис. 1. К вопросу определения энергозатрат на формовку

Таким образом,  
 $V_B < V_A < V_C$ . (4)

Поскольку источником энергии деформации для заготовки служат силы трения на контакте с инструментом, то выражение мощности, которую необходимо доставить штрипсу, запишется таким образом:

$$N_\phi = N_A + N_B + N_C + N_{\text{пот}}; \quad (5)$$

$$N_A = F_A V_A; \quad (6)$$

$$N_B = F_B V_B; \quad (7)$$

$$N_C = F_C V_C; \quad (8)$$

$$N_{\text{пот}} = N_{\text{пот}}^{\text{нез}} + N_{\text{пот}}^{\text{кинемат}}, \quad (9)$$

где  $N_A, N_B, N_C$  – мощность активных сил трения на контакте с соответствующим валком;  $F_A, F_B, F_C$  – силы трения на контакте заготовки с соответствующим валком;  $V_A, V_B, V_C$  – окружная скорость соответствующего вала;  $N_{\text{пот}}^{\text{нез}}$  – неизбежные потери мощности (механические и гидравлические потери мощности привода, потери от работы трения качения металла по валкам, потери в подшипниках и др.);  $N_{\text{пот}}^{\text{кинемат}}$  – «кинематические» потери мощности.

При записи уравнений (6)–(8) тяговые силы  $F_i$  считаются положительными, если они сонаправлены с вектором окружных скоростей соответствующего вала, т. е. энергия через границу контакта в точках  $A, B$  и  $C$  передается от инструмента к заготовке.

«Кинематические» потери связаны с возможным нарушением этого условия в соответствующих контактных точках. При таком нарушении валок, скорость которого выше, будет работать на пределе своих возможностей, испытывая перегрузки. Если же один из валков отстаёт от скорости металла в соответствующей точке контакта, то перегрузку будут испытывать два других вала. Величину перегрузки определяет либо запас фрикционных сил  $F_i$ , при превышении которого наступит буксование, либо прочностные характеристики вала и его трансмиссии.

Силы трения  $F_A, F_B, F_C$  невозможно определить, не располагая данными о значении коэффициента трения, следовательно, невозможно определить ресурс мощности, которым располагает каждый из приводных валков при формовке.

Исследованиям контактного трения посвящено огромное количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых.

Достаточно хорошо изучены случаи машинного трения, когда:

- усредненные удельные давления существенно меньше предела текучести наименее прочного материала в паре трения;
- контактные поверхности чисто обработаны;
- относительное перемещение происходит в присутствии смазки.

Также большое количество работ посвящено трению в процессах обработки металла давлением, когда:

- контактное давление превышает предел текучести материала деформируемой заготовки;
- заготовка покрыта слоем окалины, в случае горячей прокатки, либо слоем технологической смазки при холодной прокатке или прессовании.

В процессах обработки металла давлением, а также в условиях машинного трения не встречается ситуаций, подобных контактному взаимодействию инструмента и заготовки при вальцевой формовке, когда удельные давления в паре трения не превышают предела текучести деформируемого материала, одна из поверхностей покрыта слоем вторичной окалины после горячей прокатки, а другая имеет чистовую обработку и высокую твердость.

С учетом этих обстоятельств была разработана методика экспериментального исследования сил трения в условиях, идентичных условиям формовки, спроектирована, изготовлена и оснащена необходимыми средствами измерения опытная установка для исследования параметров процесса, проведен эксперимент по определению сил трения

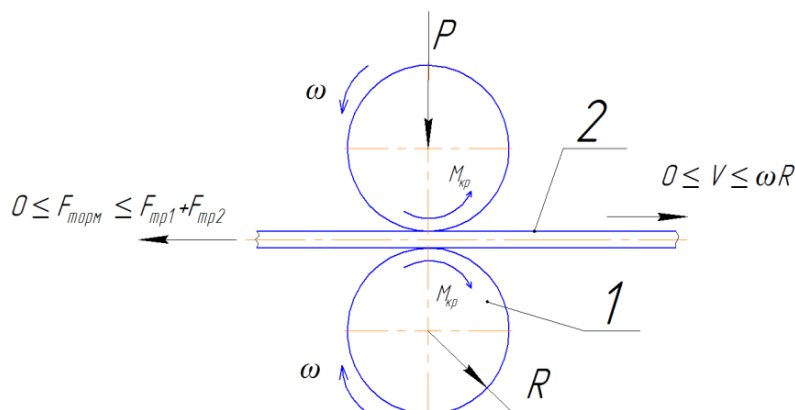


Рис. 2. Схема сил, приложенных к образцу

в условиях, максимально приближенных к условиям формовки на ЛГМ.

В качестве базовой машины был выбран прокатный стан «дуо 180». Рабочая клеть стана выполнена в виде двух станин закрытого типа, установленных на плитовину и связанных в единую несущую конструкцию.

В станине установлены валки с гладкой бочкой диаметром 170 мм и длиной бочки 200 мм. Валки выполнены из стали 9ХФ, имеют поверхностную твердость 58...60 HRC и обработаны шлифованием. Характеристики поверхности валков в полной мере соответствуют таковым для формовочной машины, которая применяется в практике промышленного производства. Управление станом осуществляется дистанционно с пульта управления.

Для реализации цели эксперимента были изготовлены образцы шириной 75 мм из листа трубной марки стали толщиной 20 мм.

Отбор образцов непосредственно от листа, прокатанного по технологии, предусмотренной для производства трубного штрипса, позволил обеспечить характеристики поверхности образцов в полном соответствии таковым для штрипса в условиях формовки на предприятии трубосварочного производства.

Определение сил трения проводилось по методу принудительного торможения полосы (рис. 2).

В соответствии с программой эксперимента образцы зажимались между валками силой  $P$  посредством нажимного механизма и протягивались приводом вращения валков с приложением монотонно растущей тормозящей силы  $F_{\text{торм}}$ , противоположенной направлению движения вплоть до возникновения буксования.

Сила прижатия назначалась таким образом, что она обеспечивала погонные усилия, соответствующие усилиям в реальной промышленной технологии вальцевой формовки.

Кинематические условия в полной мере соответствовали условиям формовки в диапазоне от режима качения валцов по заготовке, когда скорости валков согласованы со скоростью штрипса,

до буксования, когда имеет место рассогласование соответствующих скоростей.

Скоростные режимы в эксперименте также подбирались в соответствии со скоростями формовки в промышленных условиях.

Несущая конструкция устройства для создания тормозящих сил (рис. 3) была выполнена в виде балки 1, которая крепится к станине прокатной клетки. В балке выполнено два отверстия, по высоте совпадающие с уровнем межвалкового зазора. Через эти отверстия с зазором пропущены шпильки 2, на которых в пространстве между валками и балкой закреплен щелевой захват для фиксации образца при нагружении.

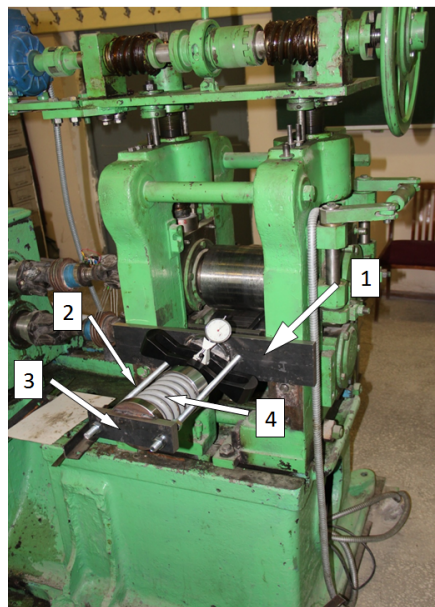


Рис. 3. Экспериментальная установка

Создание тормозящих сил, монотонно растущих в процессе движения образца, обеспечивается установкой между задней траверсой 3 и балкой 1 пружины 4, которая, для обеспечения соосности с тяговой силой, в свою очередь, надета на центрирующий палец, закрепленный на задней траверсе 3.

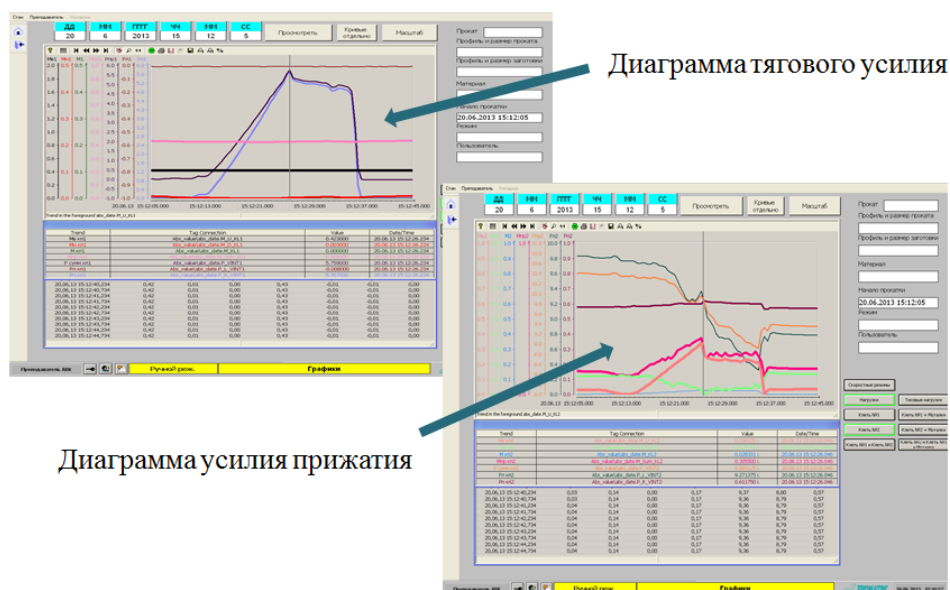


Диаграмма усилия прижатия

Диаграмма тягового усилия

Рис. 4. Представление измеряемых параметров

Таким образом, задняя траверса, шпильки и захват образуют раму, в которой установлена пружина. Рама может перемещаться в направлении движения образца и в каждой из точек уравновешена в горизонтальной плоскости противоположенными тяговой силой и силой пружины.

Регистрации тягового и нажимного усилий осуществлялась при помощи однотипных месдоз СМ–Т5.

Были проведены серийные испытания, которые преследовали следующие основные цели:

- установить значение коэффициента трения на контакте инструмента со штрипсом;
- оценить влияние контактных давлений на значения коэффициента трения;
- оценить влияние загрязнения поверхности штрипса на условия его контактного взаимодействия с инструментом;
- оценить влияние марки стали на условия контактного взаимодействия в условиях формовки.

Погонные давления в эксперименте варьировались от 84 до 322 Н/мм.

Первая серия образцов не подвергалась обезжириванию, вторая обезжиривалась спиртом, а третья обезжиривалась путем кратковременного воздействия высокой (800 °С) температуры. Обезжиривались также и валки.

В эксперименте настройки выполнялись таким образом, что буксование в каждом опыте возникало на новой, «нетронутой» области поверхности образцов, чем обеспечивалось идентичность условиям реальной технологии. В процессе каждого испытания регистрировались значения тяговых усилий и усилий прижатия валков (рис. 4). Исходя из этих данных определялся коэффициент трения.

Результаты обработки материалов эксперимента приведены в таблице.

Разброс значений коэффициента трения находится в диапазоне от 0,22 до 0,3, не учитывая пробных образцов и образцов с остаточным масляным слоем после резки.

Наблюдался относительный рост коэффициента трения на образцах, поверхность которых обезжирена лучше.

С использованием полученных данных о коэффициенте трения выполнена оценка значений момента сил трения при формовке для промышленной листогибочной машины при изготовлении трубы  $\varnothing 711 \times 25,4$  из стали К56. Усилие формовки составляет  $P = 17310$  кН:

$$M_{\text{тр}}^B = F_{\text{тр}}^B R_B^B = P_N^B \mu R_B^B = 17310 \cdot 0,3 \cdot 0,13 = 675 \text{ кНм}; \quad (10)$$

$$M_{\text{тр}}^H = F_{\text{тр}}^H R_B^H = P_N^H \mu R_B^H = 9922,15 \cdot 0,3 \cdot 0,25 = 744,16 \text{ кНм}, \quad (11)$$

где  $F_{\text{тр}}^B, F_{\text{тр}}^H$  – сила трения на контакте верхнего и нижнего валка с металлом соответственно;  $P_N^B, P_N^H$  – сила реакции опоры в точках контакта инструмента и заготовки на верхнем и нижнем валке соответственно, кН;  $\mu$  – коэффициент трения;  $R_B^B, R_B^H$  – радиус верхнего и нижнего валка соответственно, м.

Исходя из условий прочности при кручении, применительно к формовочной вальцевой машине модели RMS-hu-vo 1250мм/900 CNC, установленной в линии производства труб этого назначения на Волжском трубном заводе, допустимые крутящие моменты на верхнем  $M_{\text{кр}}^B$  и нижнем  $M_{\text{кр}}^H$  валах равны:

$$M_{\text{кр}}^B = 0,2[\tau]_B d_B^3 = 0,2 \cdot 381 \cdot 0,26^3 = 1339 \text{ кНм}; \quad (12)$$

$$M_{\text{кр}}^H = 0,2[\tau]_H d_H^3 = 0,2 \cdot 257 \cdot 0,21^3 = 463 \text{ кНм}, \quad (13)$$

где  $[\tau]_B$  – допускаемые касательные напряжения материала верхнего валка, МПа;  $[\tau]_H$  – допускае-

Результаты эксперимента

№ серии	Материал	Подготовка поверхности	Усилие сопротивления пружины $F_{горм}, кН$	Полное усилие $R, кН$	Погонное усилие $R_p, Н/мм$	Коэффициент трения $\mu = F_{горм}/2P$	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
1	X70	Н/О	2,566	7,292	97,226	0,175	Пробный образец
2	X70	Н/О	4,497	7,76	103,466	0,289	
3	Ст20	О	3,879	7,293	97,24	0,265	
4	X70	О	3,035	6,322	84,293	0,240	
5	X70	О	4,61	9,862	131,493	0,233	
6	X70	Н/О	7,271	16,093	214,573	0,225	
7	X70	Н/О	5,767	15,338	204,506	0,187	присутствовал маслянный слой
8	X70	О	7,827	15,448	205,973	0,253	
9	Ст20	О	6,895	14,221	189,613	0,242	
10	X70	Т/О	5,76	9,52	126,933	0,302	
11	X70	Т/О	7,507	15,82	210,933	0,237	образец с образованием сажи
12	X70	Т/О	9,941	17,92	238,933	0,277	
13	Ст20	Т/О	12,497	21,578	287,706	0,289	произошел срез болта на захвате
14	X70	Т/О	8,288	18,418	245,573	0,224	
15	X70	Т/О	11,815	24,185	322,466	0,244	

Н/О – необезжиренная поверхность, О – обезжиренная поверхность, Т/О – термообработанная поверхность.

мые касательные напряжения материала зубчатого вала нижнего вала;  $d_v$  – диаметр верхнего вала, м;  $d_b$  – диаметр шейки зубчатого хвостовика вала нижнего вала, м.

Следовательно, на контакте верхнего вала с металлом момент сил трения меньше допустимого крутящего момента, и при перегрузке верхнего вала может возникнуть буксование. На опорных же валах максимальный момент сил трения, который может быть создан силами трения, больше допустимого крутящего момента, что при перегрузке может привести к поломке вала. Это предположение подтверждается реальным случаем поломки хвостовика нижнего опорного вала.

С учетом данных обстоятельств для согласования скоростей металла и вала необходима система автоматического управления приводом, которая в следящем режиме способна перераспределять крутящие моменты между валами. При этом нужно учесть, что нагрузки между верхним и нижним валами должны быть распределены пропорционально допускаемым крутящим моментам, которые определяются диаметром наиболее опасного сечения и предельными касательными напряжениями для материала валков.

Достижение баланса в распределении мощностей на вальцах листогибочной машины экономически эффективно, поскольку при оптимальном распределении нагрузок:

– расширяется граница возможностей машины по производству труб с малым отношением

$D/h$ , для формовки которых необходимо приложение наибольших крутящих моментов;

– увеличивается ресурс работы валков по усталостной прочности;

– уменьшается количество вынужденных простоев оборудования, вызванных поломками оборудования;

– сокращается потребляемая мощность машины за счет снижения кинематических потерь в условиях возникновения пробуксовок на границе инструмента с заготовкой.

#### Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

– впервые был определен коэффициент трения в условиях, идентичных условиям контактного взаимодействия заготовки и инструмента при вальцевой формовке труб большого диаметра;

– полученные данные позволяют обоснованно определять запас фрикционных сил и параметры процесса формовки при разработке технологии и оборудования формовки труб в вальцах;

– показано, что расширение границ применения существующей листогибочной машины ОАО «ВТЗ» в сегменте труб с малым показателем  $D/h$  возможно только при максимальном использовании ресурса валков за счет оптимизации распределения мощностей привода между валками;

– правильное распределение мощностей привода валков сократит вынужденные простои оборудования, вызванные поломкой инструмента,

## Обработка металлов давлением

---

потери от произведенной продукции, а также затраты на изготовление нового инструмента и уменьшит энергоёмкость процесса;  
– проведенные экспериментальные исследо-

вания позволят использовать достоверные данные о коэффициенте трения при цифровом моделировании процесса формовки с целью разработки технологических режимов.

**Ильичев Владимир Гаврилович**, канд. техн. наук, доцент кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет; заведующий лабораторией труб большого диаметра, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; [ilichevvg@susu.ac.ru](mailto:ilichevvg@susu.ac.ru).

**Залавин Яков Евгеньевич**, аспирант кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет; младший научный сотрудник лаборатории труб большого диаметра, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; [zalavin@rosniti.ru](mailto:zalavin@rosniti.ru).

*Поступила в редакцию 11 марта 2015 г.*

---

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FRICTION FORCES IN THE DEFORMATION ZONE AT ROLLER FORMING OF LARGE-DIAMETER PIPES

*V.G. Il'ichev, South Ural State University; JSC "Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries" (RosNITI), Chelyabinsk, Russian Federation; [ilichevvg@susu.ac.ru](mailto:ilichevvg@susu.ac.ru), Ya.E. Zalavin, South Ural State University; JSC "Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries" (RosNITI), Chelyabinsk, Russian Federation; [zalavin@rosniti.ru](mailto:zalavin@rosniti.ru)*

In roller molding of blanks for large diameter pipes all the work of deformation is realized by friction forces that transmit the drive power to the strip across the surface of the contact interaction with the rolls. In a typical process of forming the specificity of the contact boundary is the contact between clean polished surface of tempered roll with a roller surface of the workpiece coated with a layer of mill scale. Almost no data are available in the literature on the coefficients of friction in such conditions.

Since the active forces of friction determine the resource of expansion process capability without slipping of rolls relative to strip, reliable data on the frictional forces are required for calculation of technological regimes and evaluation of loads on the elements of transmission.

The paper presents experimental data on determination of the coefficient of friction obtained under conditions as close as possible to the conditions of forming pipe billets on a triple roll bending machine. Experimental technique and the description of the laboratory setup with the necessary means of measurement are described. The impact of major technological factors on the coefficient of friction is estimated.

*Keywords: roller forming; friction coefficient; rolls; experiment.*

*Received 11 March 2015*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ильичев, В.Г. Экспериментальное определение сил трения в очаге деформации при вальцевой формовке труб большого диаметра / В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 127–132.

### FOR CITATION

Il'ichev V.G, Zalavin Ya.E. Experimental Determination of the Friction Forces in the Deformation Zone at Roller Forming of Large-Diameter Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 127–132. (in Russ.)