

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.771.013

DOI: 10.14529/met170110

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СИЛ НА ГРАНИЦЕ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

В.Г. Ильичев^{1, 2}, Я.Е. Залавин²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

² ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск

Наиболее жестко геометрические характеристики поперечного сечения регламентируются для труб, предназначенных для подводных участков, где допустимое отклонение от теоретической окружности составляет по телу трубы 1...1,5 % от диаметра и 0,75...1 % от диаметра по торцам.

Форма поперечного сечения труб большого диаметра образуется в процессе комплекса деформационных операций по формированию из штрипса трубной заготовки, корректировки этой геометрии под действием сварочных напряжений и калибровки в процессе финишной операции экспандирования.

Результаты операции экспандирования во многом зависят от геометрических характеристик заготовки перед этой операцией и от кинематики контактного взаимодействия инструмента и заготовки непосредственно при экспандировании.

Важную роль при этом играют силы трения между контактирующими поверхностями экспандерной головки и трубы, поскольку под влиянием этих сил может происходить перераспределение тангенциальных деформаций и, соответственно, искажение геометрии.

В статье представлены экспериментальные материалы по определению коэффициента трения, полученные в условиях, максимально приближенных к условиям экспандирования труб большого диаметра. Приведены методика проведения эксперимента, описание лабораторной установки с необходимыми средствами измерения. Выполнена оценка влияния основных технологических факторов на величину коэффициента трения.

Ключевые слова: экспандирование; коэффициент трения; сила трения; окалина; смазка.

При экспандировании периметр трубы увеличивается в соответствии с назначенным коэффициентом деформации, который, как правило, находится в пределах $k_s = 1,008 \dots 1,01$.

Особенность кинематики процесса состоит в том, что тангенциальный размер рабочей поверхности накладки при этом остается неизменным, а увеличение диаметра головки экспандера происходит за счет увеличения тангенциальных зазоров между отдельными накладками.

В этих условиях, после охвата головки внутренней поверхностью трубы, вместе с ростом радиальных усилий на границе контакта инструмента с заготовкой изменяются тангенциальные силы, которые могут привести к перераспределению тангенциальных де-

формаций и, в конечном итоге, к отклонению профиля периметра от окружности.

Для оценки влияния тангенциальных контактных сил трения на распределение деформаций экспандирования необходимо знать величину этих сил, которая зависит от коэффициента трения на границе контакта инструмента с заготовкой.

Цифровые технологии исследования процесса экспандирования, да и других процессов металлообработки, могут привести к достоверным результатам при условии использования граничных условий, соответствующих условиям реальной технологии.

Несмотря на то, что первые попытки сформулировать закон трения предпринимались Леонардо да Винчи на рубеже XV и

Обработка металлов давлением...

XVI веков, в 1699 году Амонтон сформулировал его в виде $F_t = \mu \cdot N$, где N – нормальная составляющая полного контактного усилия, а в 1781 году Кулон уточнил этот закон, введя дополнительную составляющую, и предложил его в виде $F_t = \mu \cdot N + B$, где B – составляющая от адгезионных сил. Большинство ведущих ученых в области исследования природы и закономерностей трения утверждают, что применение для практических расчетов закона Амонтона – Кулона с использованием значений коэффициентов трения, которые приводятся в справочной литературе, может привести к существенным отклонениям реальных сил трения от расчетных [1–3].

Такое противоречие связано с огромным многообразием факторов, которые в совокупности определяют коэффициент трения, а справочные данные получены опытным путем при вполне конкретном сочетании условий на границе пары трения.

При экспандировании происходит переход от трения покоя к трению относительного движения, на границе контакта присутствует смазка, значителен переход давлений по периметру контакта.

Результаты исследования сил трения в контактной паре «тело, покрытое вторичной окалиной – чисто обработанная закаленная поверхность» в литературе не представлены, поэтому для решения технологических задач,

в которых силы трения оказывают значимое влияние на результат, необходимо получить значения коэффициента трения путем проведения эксперимента в условиях, максимально приближенных к условиям реальной технологии, в данном случае – экспандирования.

Реализовать такую задачу на действующем экспандере практически невозможно, поскольку для получения нужной информации нужна специальная экспандерная головка, оснащённая силоизмерительными датчиками для контроля контактных усилий на рабочих поверхностях накладок, поэтому задача была поставлена как имитационная при максимальном приближении условий в эксперименте к реальным.

В качестве экспериментальной установки был применен двухклетевой прокатный стан (рис. 1), каждая из клеток которого (А и Б на рис. 1) выполнена в варианте «дуо». Клетки идентичны по конструкции.

Рабочие валки клеток установлены через подшипники качения в подушках. Блоки нижних валков 1 установлены в станинах неподвижно, а блоки верхних валков 2 имеют возможность перемещаться вертикально в станинах 3 от электромеханического нажимного устройства 4 с червячно-винтовой самотормозящейся передачей. Зазор между валками может регулироваться в диапазоне $0 \leq S \leq 80$ мм.

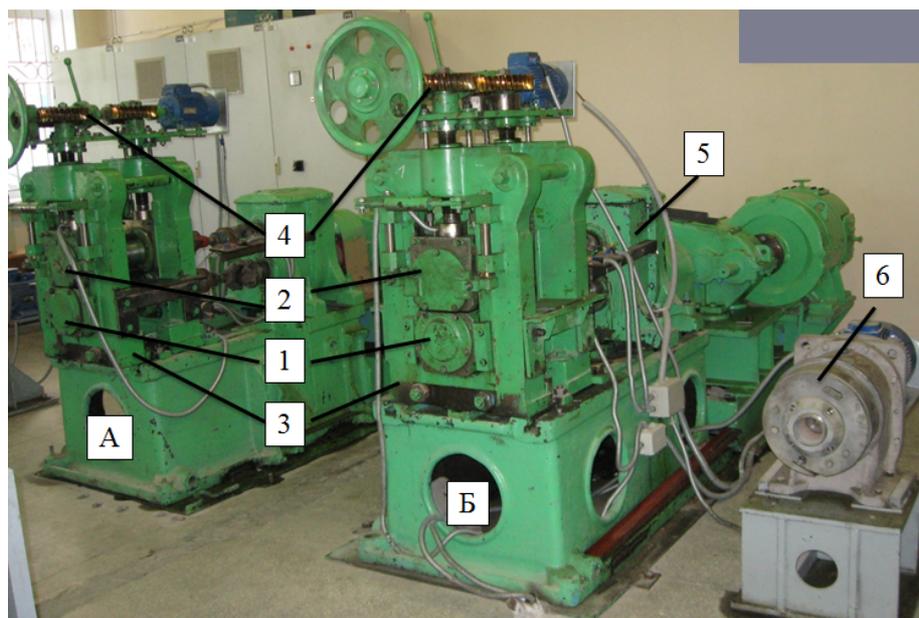


Рис. 1. Двухклетевой прокатный стан: А и Б – рабочие клетки; 1 – блок нижнего валка; 2 – блок верхнего валка; 3 – станина закрытого типа; 4 – электромеханический нажимной механизм с червячно-винтовой передачей; 5 – главный привод; 6 – моталка

Валки приводятся во вращение от главного привода 5 с регулируемой частотой вращения через шестеренную клетку и шпиндели с универсальными шарнирами.

Стан оборудован полосовыми моталками 6 с частотно-регулируемым приводом барабанов через мотор-редуктор.

Закрепление конца наматываемой ленты обеспечивается специальными захватами, выполненными на барабанах.

Клетка «А» в эксперименте использовалась для создания фрикционных сил прижатием образцов к шлифованной пластине, а клетка «Б» для создания сил относительного смещения контактирующих тел фрикционной пары при условии преодоления этими силами сил трения в контакте.

В качестве поверхности, которая имитировала воздействие накладок головки экспандера на внутреннюю поверхность трубы, была использована закаленная пластина 4, обработанная с двух сторон до чистоты $Ra\ 1,25$ (рис. 2).

Образцы 2 из термоупрочненной по технологии ТМО стали X70 устанавливались в башмаки 1, на рабочей поверхности которых был выполнен паз, глубина которого меньше толщины образца на 1,5 мм, а ширина соответствовала ширине образца. Таким образом, поверхность образца выступала над поверхностью башмака, а стенки паза исключали возможность смещения образца в направлении тягового усилия.

В итоге комплектовался пакет, в котором

шлифованная пластина рабочими поверхностями находилась в контакте с двумя образцами. Комплектный пакет устанавливается между валками клетки «А».

В целях предотвращения смещения башмаков по поверхности валка или проворачивания валков под действием фрикционных сил при нагружении пластины тяговым усилием, в клетку «А» устанавливались упорные пластины 5, которые своими заплечиками с регулировочными винтами упирались в стойки станины клетки 7.

Винтами 6 обеспечивалась фиксация и при необходимости настройка согласованного взаимного положения привалочной поверхности башмаков.

Такая опция необходима для обеспечения равномерного распределения усилия прижатия по рабочей поверхности образца при нагружении тяговым усилием.

Тяговое горизонтальное усилие прикладывалось к шлифованной пластине от ленты 3 сечением 1×100 мм через измерительный блок 2 и систему специальных захватов 4 (рис. 3).

Тяговая лента, в свою очередь, пропускалась между валками с гладкой бочкой в клетку «Б» и, после закрепления свободного конца в захвате барабана моталки, подматывалась на барабан с целью исключения пробуксовки под нагрузкой.

Тяговое усилие создавалось фрикционными силами между валками клетки «Б» и зажатой между ними нажимным механизмом

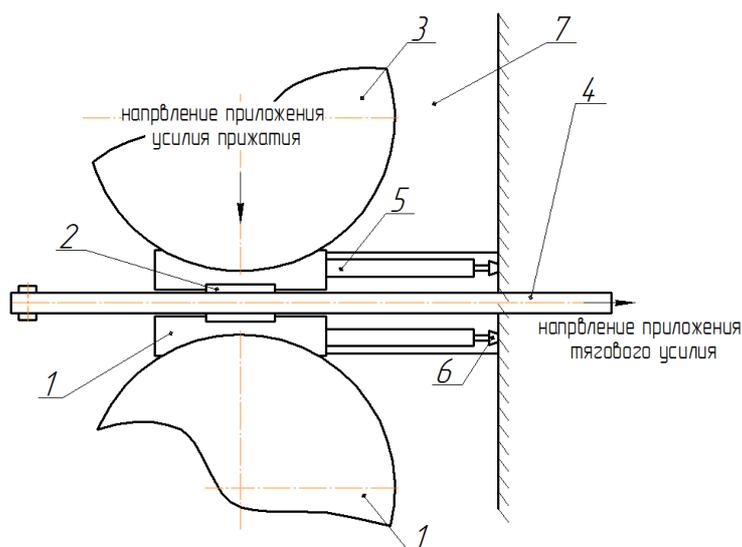


Рис. 2. Схема установки образцов в клетку «А» и компенсации смещений пакета: 1 – башмаки; 2 – образцы; 3 – рабочие валки; 4 – шлифованная пластина; 5 – упорная пластина; 6 – регулировочные винты; 7 – станина

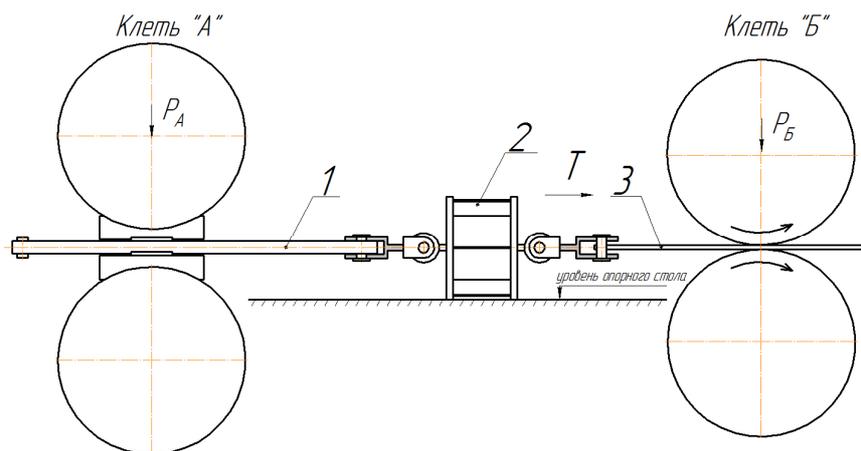


Рис. 3. Схема приложения тяговой нагрузки: 1 – нагружаемая пластина; 2 – измерительный комплект с месдозой; 3 – тяговая лента

этой клетки тяговой ленты при включении главного привода клетки «Б».

В случае если фрикционных сил между лентой и вальцами клетки «Б» не хватало для преодоления фрикционных сил между образцами и шлифованной пластиной в клетке «А», дополнительное тяговое усилие создавалась моталкой.

Как для измерения усилия прижатия контактирующих поверхностей исследуемой пары, так и для измерения тяговых усилий вплоть до преодоления силы трения в контактной паре применялись месдозы Dacell CM-T5.

Месдозы в клетке «А» устанавливались под оба нажимных винта для компенсации влияния на результаты измерения поперечного смещения комплекта для испытаний относительной продольной оси симметрии клетки «А».

Компенсация перекосов месдозы при установке обеспечивалась сферическими подпятниками между нажимными винтами и месдозами.

Месдоза для измерения тягового усилия помещалась в специально изготовленную «корзину» (поз. 2 на рис. 3) между клетками «А» и «Б» и укладывалась на стол, уровень которого обеспечивал единую высотную отметку нагружаемой пластины, оси месдозы и линии прокатки клетки «Б», на которой находилась тяговая лента.

Таким образом, полностью компенсировалось искажение значения тягового усилия от веса измерительного комплекта.

Для обеспечения достоверности измерительной информации непосредственно перед проведением эксперимента месдозы были

подвергнуты тарировке с соблюдением всех основных правил при проведении этого вида работ.

Связь напряжения в стенке трубы и гидростатического давления в ее полости имеет вид [4]

$$\sigma = \frac{p \cdot R}{h}, \quad (1)$$

где p – действующее давление; R – средний радиус трубы; h – толщина стенки.

Для условной трубы $\varnothing 1000$ мм из стали X70 с пределом текучести $\sigma_T = 550$ Н/мм² толщина стенки по предельным напряжениям связана с действующим давлением зависимостью

$$h_{\min} = \frac{R}{\sigma_T} \cdot p, \quad (2)$$

откуда $h_{\min} = 0,909 \cdot p$.

Тогда для трубы $\varnothing 1000$ со стенкой $h = 20$ мм из стали X70 среднее давление, действующее на внутреннюю стенку трубы, составляет порядка 22 Н/мм².

По технологическим условиям изготовления и условиям проведения эксперимента образцы из трубной стали были выполнены размерами 25×70 мм.

В таком случае значение усилия сжатия должно составлять

$$22 \cdot 25 \cdot 70 = 3,85 \cdot 10^4 \text{ Н}. \quad (3)$$

Из этих условий и прикладывалась нагрузка в клетке «А». В ходе эксперимента, кроме варьирования усилиями прижатия, было исследовано влияние концентрации эмульсии на фрикционные силы.

Поскольку в реальных условиях удельное усилие сжатия на границе инструмента и заготовки распределено неравномерно, усилие сжа-

тия варьировалось в диапазоне $10^4 \dots 4 \cdot 10^4$ Н с шагом 10^4 Н.

При этом каждое нагружение повторялось по 3 раза на каждой из концентраций эмульсии.

Концентрация эмульсии бралась в трех вариантах: 5%-ный раствор эмульсола Ratak 6210 R в дистиллированной воде, 10%-ный раствор эмульсола и концентрат эмульсола.

Каждый из опытов выполнялся в следующем порядке:

– при разведенных валках клетки «А» в нее устанавливался комплект 1, 2, 4 в положение, которое показано на рис. 2;

– граница контакта образцов со шлифованной пластиной смазывалась эмульсией соответствующей концентрации;

– шлифованная пластина через измерительный комплект соединялась с тяговой лентой;

– валки клетки «Б», между которыми была зажата тяговая лента, сжимались усилием порядка 80 кН;

– валки клетки «А», между которыми установлен и зафиксирован от смещения комплект, сжимались усилием в соответствии с вариантом программы испытаний; контроль усилия осуществлялся по сигналу с мездоз под винтами клетки «А» на экране монитора пульта управления;

– включался главный привод клетки «Б» при заданной скорости 0,02 м/с вплоть до смещения шлифованной пластины в направлении тягового усилия на величину 20...30 мм; регистрировались сигналы мездоз под винтами клетки «А» и в корзине силоизмерителя натяжения; в случаях, когда фрикционных сил клетки «Б» не хватало для преодоления измеряемых сил трения, включался привод моталки, что обеспечивало создание необходимого усилия;

– разводились и при вращении валки клетки «А»;

– реверсом главного привода клетки «Б» тяговая лента возвращалась в стартовую позицию;

– отработанные образцы извлекались из башмаков, и цикл повторялся в соответствии с программой эксперимента.

Результаты, представленные в таблице и графически на рис. 4, согласуются с существующими научными данными о том, что силы трения из-за большого количества факторов влияния очень нестабильны, и реальный ко-

эффициент трения в условиях наличия граничного слоя смазки зависит от соотношения молекулярной составляющей и составляющей механической.

В условиях присутствия вторичной окислы молекулярная составляющая исчезающе мала и не оказывает реального влияния на усилия относительного смещения.

Механическая составляющая проявляется следующим образом.

При минимальных усилиях взаимного прижатия контактирующих поверхностей, которые в условиях эксперимента составляли 10 кН, что соответствовало средним значениям удельного давления 5,715 МПа, коэффициент трения отличался значительным разбросом и вне зависимости от концентрации эмульсии его среднее значение составило $\sim 0,18$.

С ростом полного усилия до 20 кН реальная площадь контакта росла за счет упругих деформаций образца и взаимной адаптации его макроповерхности и макроповерхности шлифованной пластины – имитатора сегмента экспандерной головки. Удельные нагрузки при этом падали, что сопровождалось снижением роли механической составляющей сил трения от преодоления сопротивления микро-рельефа. Общий коэффициент трения снизился до 0,15 с некоторым снижением диапазона разброса значений. Влияние концентрации эмульсии также никак не проявилось.

Дальнейшее увеличение усилия взаимного прижатия рабочих поверхностей до 30 кН сопровождалось некоторым ростом коэффициента трения до среднего значения 0,18, что объясняется увеличением доли механической составляющей работы трения, расходуемой на передеформацию микро-рельефа и вертикальные перемещения на преодоление микронеровностей.

С ростом нормальной нагрузки на следующем шаге до 40 кН наметился явный тренд стабилизации сил трения с коэффициентом порядка 0,19...0,2.

Увеличить нагрузки до больших величин не представлялось возможным по причине ограничения тяговых усилий условиями опрокидывания клетки в соответствии с условиями ее закрепления на плитовинах, но в этом не было особой необходимости, потому что диапазон нагрузок, предусмотренный планом эксперимента, был пройден.

Из результатов эксперимента следует, что при достижении удельных давлений (усред-

Обработка металлов давлением...

Результаты эксперимента

№	Концентрация эмульсола, %	Усилие прижатия*, кН		Тяговое усилие T, кН	Коэффициент трения, μ	
		Номинальное	Фактическое			Среднее значение
1	5	10	12,2	5,1	0,209	0,190
2	5	10	11,1	4	0,180	
3	5	10	9,6	3,5	0,182	
4	5	20	21,2	5,9	0,139	0,153
5	5	20	20,3	7	0,172	
6	5	20	19,5	5,8	0,149	
7	5	30	28,5	11,7	0,205	0,179
8	5	30	29	9,6	0,166	
9	5	30	30	9,9	0,165	
10	5	40	38	12,6	0,166	0,205
11	5	40	40,2	18,492	0,230	
12	5	40	36	15,84	0,220	
13	10	10	11,5	3,1	0,135	0,180
14	10	10	11,5	5	0,217	
15	10	10	14,6	5,5	0,188	
16	10	20	19,5	6,2	0,159	0,146
17	10	20	16,5	4,2	0,127	
18	10	20	20,23	6,1	0,151	
19	10	30	29,6	9,1	0,154	0,188
21	10	30	29,4	13	0,221	
22	10	30	23,6	9	0,191	
23	10	40	39	14,82	0,190	0,200
24	10	40	38,5	17,71	0,230	
25	10	40	40	14,4	0,180	
26	100	30	28,9	12	0,208	0,184
27	100	30	29	9,3	0,160	

* Различие номинального, установленного до приложения тягового усилия, и фактического усилий прижатия связано с расклинивающим действием башмаков на валки клетки.

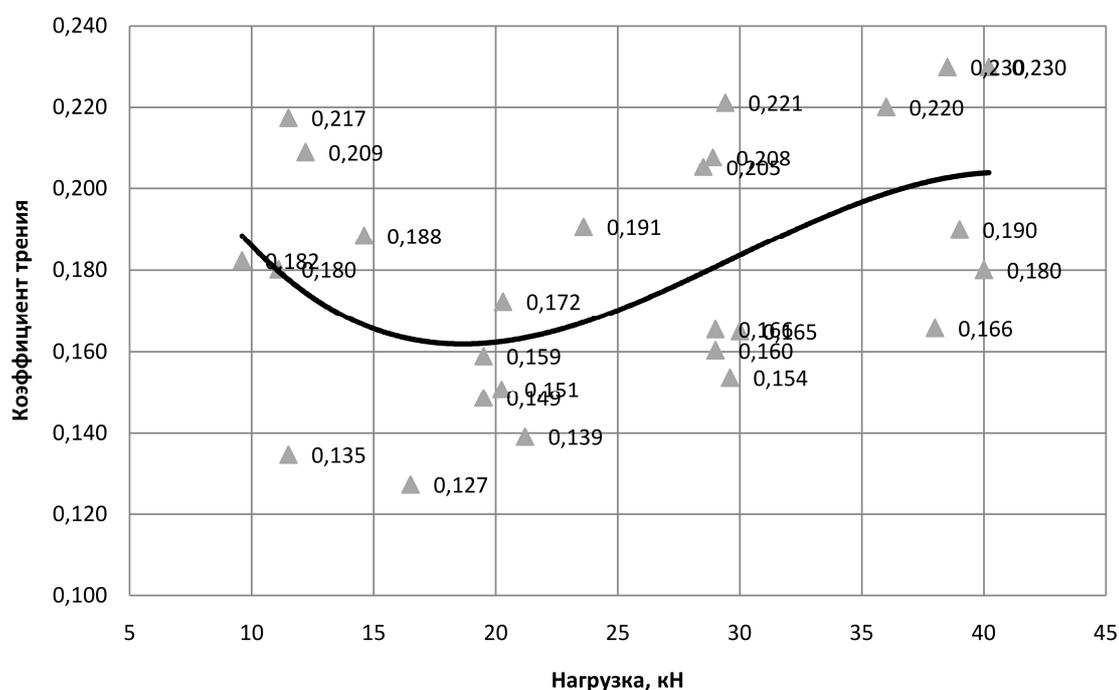


Рис. 4. Коэффициент граничного трения в диапазоне удельных давлений $5, 75 \leq p \leq 23$ МПа

ненных) порядка 22...25 МПа коэффициент трения стабилизируется на уровне $f \cong 0,2$ и не зависит от концентрации эмульсии.

Для подтверждения этого положения были проведены два дополнительных испытания (образцы № 28 и № 29) при нагрузке 30 кН, когда в качестве смазки применялся концентрат эмульсола без разведения его водой.

В этих опытах среднее значение коэффициента трения составило $f_{100\%} \cong 0,184$, что согласуется со значениями f при той же нагрузке в условиях применения эмульсии с концентрацией 5 и 10 % и отличается от средних значений, полученных на разведенной эмульсии, на 8 %.

Большое количество факторов влияния, в числе основных из которых: распределение удельных давлений по площади (геометрической) контакта, параметры микрорельефа в конкретном опыте, наличие в зоне контакта инородных тел, например, мелкодисперсной окалины, приводит к тому, что в каждом конкретном опыте сочетания граничных условий несколько различаются. По этой причине наблюдается некоторый разброс значений коэффициента трения.

Таким образом, экспериментально получены данные о значении коэффициента трения при контактом взаимодействии тела, покрытого вторичной окалиной, и контртела, закаленная поверхность которого обработана до $Ra \approx 1,25$.

В эксперименте исследовано влияние концентрации эмульсии, которая применялась

в качестве смазки границы контакта, и уровня удельных давлений.

Результаты исследования согласуются с существующими представлениями об определяющей роли механической составляющей при формировании силы трения в условиях отсутствия ювенильных контактных поверхностей.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании кинематики в процессе экспандирования, в том числе и как граничные условия при создании и реализации цифровых моделей.

Методика проведения и оснастка позволяют в широком диапазоне варьировать сочетания материалов контактной пары, чистоту обработки, виды смазки и могут быть эффективно использованы в учебном процессе при подготовке специалистов в области обработки материалов давлением.

Непосредственное измерение усилий сжатия и тангенциальных сил обеспечивает хорошую достоверность экспериментальных данных.

Литература

1. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
2. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

Ильичев Владимир Гаврилович, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; заведующий лабораторией труб большого диаметра, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; ilichevvg@susu.ru.

Залавин Яков Евгеньевич, младший научный сотрудник лаборатории труб большого диаметра, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; zalavin@rosniti.ru.

Поступила в редакцию 20 января 2017 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTIONAL FORCES AT THE BOUNDARY BETWEEN TOOL AND WORKPIECE DURING EXPANSION OF LARGE DIAMETER PIPES

V.G. Il'ichev^{1, 2}, ilichevvg@susu.ru,
Ya.E. Zalavin², zalavin@rosniti.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries (RosNITI), Chelyabinsk, Russian Federation

Most rigidly geometric characteristics of the cross section is regulated to pipes intended for off-shore sites where permissible deviation from the theoretical circumference of pipe body 1...1.5 % of the diameter and 0.75...1 % of the diameter at the ends.

The sectional shape of large diameter pipes formed during the complex forming operations deformation of billets strip adjusting this geometry under the influence of welding stresses and calibration in the process of finishing operations of expansion.

The results of operations of expansion depends on the geometry of the workpiece in front of the operation and to the dynamics of contact interaction between tool and workpiece directly at of expansion.

An important role is played by the frictional force between the contacting surfaces of the pipe expander head and because under the influence of these forces redistribution tangential deformation can occur and, consequently, the distortion geometry.

The paper presents experimental data to determine the coefficient of friction, resulting in conditions as close as possible to the conditions of expansion of large diameter pipes. The technique of the experiment, a description of the laboratory setup with the necessary measurement tools. The estimation of influence of the main technological factors on the value of the coefficient of friction.

Keywords: expansion, coefficient of friction, friction force, scale, grease.

References

1. Bowden F.P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford University Press, 1950. 337 p.
2. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p.
3. Akhmatov A.S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya* [Molecular Physics of Boundary Friction]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 472 p.

Received 20 January 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ильичев, В.Г. Экспериментальное исследование фрикционных сил на границе инструмента и заготовки в условиях экспандирования труб большого диаметра / В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 81–88. DOI: 10.14529/met170110

FOR CITATION

Il'ichev V.G., Zalavin Ya.E. Experimental Study of Frictional Forces at the Boundary Between Tool and Workpiece During Expansion of Large Diameter Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 81–88. (in Russ.) DOI: 10.14529/met170110