

- критерию износостойкости элементов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русанов // Трение и износ, 2016. т.37. № 5. С.510-516.
9. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1974. 560с.
 10. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «Фан» УзССР, 1985. 165с.
 11. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел / В.В. Федоров; под ред. С.В. Федорова. - Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2014.- Ч.III. Основы эргодинамики деформируемых тел.- 222с.
 12. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник.-М.: Машиностроение, 1983.-543с.
 13. Иванов М.Н. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов.- 12-е изд. испр.- М.: Высш. шк., 2008.- 408 с.
 14. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах. М.: Машиностроение.1976. 261с.
 15. Соппротивление материалов, Н.М. Беляев, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1976г., стр.608.
 16. Физика. Большой энциклопедический словарь.- М.: Большая Российская энциклопедия, 1999.- 460 с.
 17. Стали и сплавы. Марочник: справ. изд. / Сорокин В.Г., Герасьев М.А., Палеев В.С. и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
 18. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности). Справочник Гребеник В.М., Цапко В.К., "Металлургия",1980.344с.
 19. Курсовое проектирование деталей машин: Учеб. пособие для учащихся машиностроительных специальностей техникумов / С.А Чернавский, К.Н. Бокков, И.М. Чернин и др.- 2-е изд. перераб. и доп.-М.: Машиностроение, 1988.-416с.
 20. Antsupov A.V.,(jr.), Antsupov A.V. and Antsupov V.P. Estimation and Assurance of Machine Component Design. Procedia Engineering 150 (2016) 726-733.



УДК 621.774.38

А.В. Выдрин, В.И. Кузнецов, К.Ю. Яковлева
 ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»,
 г. Челябинск, Россия
 E-mail: secretariat@rosniti
 Дата поступления: 11.10.2016

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ПРИМЕНИМОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация

В статье приведены результаты экспериментального исследования трибологических параметров смазочного материала «Dexlube 498». Изучено влияние скорости волочения на изменение коэффициента трения при использовании смазочного материала «Dexlube 498». Показано, что увеличение скорости волочения до 70 м/мин позволяет уменьшить коэффициент трения в 1,5 раза. Результаты данного исследования использованы для численной оценки эффективности использования ресурса пластичности металла при оправочном волочении котельных труб наружным диаметром от 28 до 80 мм и толщиной стенки от 2 до 10 мм из углеродистой стали марок 10, 20, 12Х1МФ и др. по действующим маршрутам Синарского трубного завода. Показано, что за счет расширения диапазона применимости смазочного материала «Dexlube 498» имеется возможность повышения эффективности действующей технологии изготовления холоднодеформированных труб.

Ключевые слова: холоднодеформированные трубы, волочение труб, трибология, трибометр, смазочный материал, коэффициент трения, скорость волочения.

Введение

Современная технология изготовления холоднодеформированных труб обеспечивает выпуск технологически сложной продукции ответственного назначения, потребность в которой с развитием приоритетных отраслей машиностроения непрерывно увеличивается. Увеличение спроса требует решения задач по повышению производительности процессов холодной деформации. Одним из эффективных способов интенсификации производства является рациональное использование высокоэффективных смазочных материалов. Для процессов оправочного волочения труб выбор высокоэффективных смазочных материалов является актуальной задачей, так как определяет скорость процесса, износ инструмента и качество продукции.

На отечественных предприятиях наибольшее распространение получил способ волочения на удерживаемой цилиндрикоконической оправке, используемый главным образом для изготовления котельных труб. Применение удерживаемых оправок связано с трудностями процесса захвата смазочного материала и обеспечения благоприятных условий трения на контактных поверхностях. Указанные недостатки являются причиной получения задиров на внутренней поверхности труб. Решением указанных проблем является использование современных смазочных материалов в процессе

оправочного волочения, а именно жидких технологических смазок, не требующих нанесения подсмазочного покрытия [1, 2]. Отсутствие в технической литературе информации о коэффициентах трения, обеспечиваемых при их использовании, а также результатов исследований влияния условий волочения на изменение их трибологических свойств, снижает корректность инженерных расчетов силовых параметров волочения с использованием существующих методик. Таким образом, была поставлена задача проведения исследования по определению коэффициента трения скольжения при волочении труб на жидких смазочных материалах.

Основная часть

Коэффициент трения скольжения определяли путем моделирования процесса трения скольжения при волочении на специальном трибометре¹, элементом трибосоприжения в котором является пара «диск-палец» (см. рисунки 1, 2). Принцип работы трибометра заключается в следующем: в начальный момент приложения внешней нагрузки $P_{вн}$ палец 1 начинает контактировать с вращающимся диском 2, изменяя подводимый со стороны привода 3 крутящий момент M_{∂} . На контактной поверхности возникают силы трения $F_{тр}$ и соответственно крутящий момент $M_{тр}$.



Рисунок 1. Трибометр:

1 – палец; 2 – диск; 3 – привод; 4 – датчик

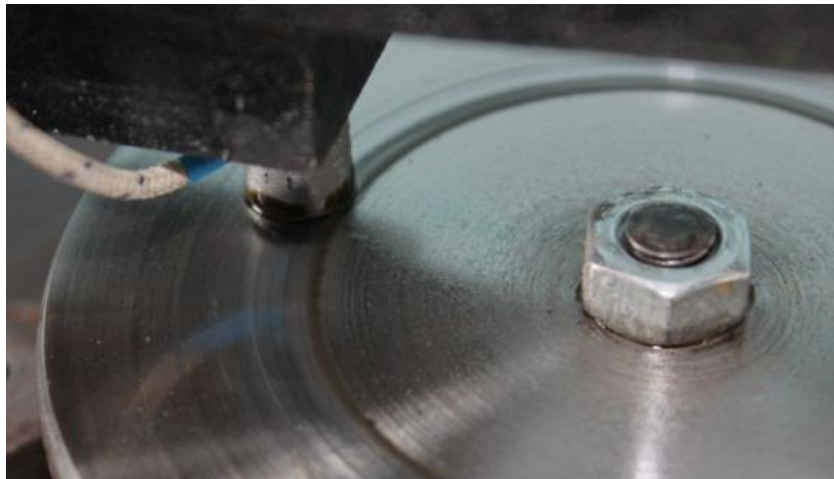


Рисунок 2. Зона контакта пары трения «диск-палец»

Принимая за основу зависимость, где коэффициент трения скольжения f определяется как отношение момента M_{mp} , создаваемого силой трения, к произведению усилия прижатия пальца к диску P_{mp} и радиус вектора r до точки приложения данного усилия:

$$f = \frac{M_{mp}}{P_{mp} \cdot r}, \quad (1)$$

была разработана методика расчета коэффициента трения применительно к рассматриваемой механической системе. Искомые составляющие были определены с использованием условия равновесия моментов сил. Таким образом, формула (1) была приведена к следующему виду:

$$f = \frac{0,3 P_0}{P_{mp}}, \quad (2)$$

где P_0 – усилие отклонения рычага трибометра, определяемое с помощью тензометрического датчика;

P_{mp} – усилие прижатия пальца к диску.

При этом P_{mp} зависит от внешней нагрузки $P_{вн}$ и может быть определено по формуле, полученной в результате тарировки:

$$P_{mp} = 2,53 P_{вн} + 21,2. \quad (3)$$

Особенностью использования трибометра для исследования трения скольжения является необходимость в предваритель-

ном математико-физическом моделировании, позволяющем на малогабаритных образцах лабораторного трибометра воспроизводить силовые и тепловые поля, характерные для различных условий трения, в частности для условий трения при волочении [3]. Данный способ моделирования основан на применении теории подобия, результатом которой являются аналитически полученные масштабные коэффициенты перехода от модели к натуре. Коэффициенты подобия используют для распространения на реальные производственные условия закономерностей и количественных данных, полученных на трибометре [3, 4].

Таким образом, для адаптации результатов, получаемых на трибометре к реальному процессу волочения, в качестве основного принципа подобия принят силовой, определяемый по следующей формуле:

$$\frac{P_{вол}}{P_{mp}} = \frac{F_1}{F_{обр}}, \quad (4)$$

где $P_{вол}$ – реальное усилие волочения;

P_{mp} – усилие прижатия пальца к диску;

F_1 – площадь поперечного сечения трубы на выходе из очага деформации;

$F_{обр}$ – площадь контактной поверхности пальца с диском.

¹ Трибометр – трибометрическое оборудование, используемое в лабораторных условиях для исследования трибологических свойств материалов

Отношение $\frac{P_{вол}}{F_1}$ представляет собой

напряжение волочения $\sigma_{вол}$, определяющее напряженное состояние металла трубы в очаге деформации при волочении и зависящее от таких параметров, как сопротивление пластической деформации, степень деформации, профилировка волочильного инструмента, условия трения на контактных поверхностях. Учитывая, что в большей степени из указанных определяющих параметров на $\sigma_{вол}$ оказывает влияние сопротивление металла пластической деформации, то условно отношение $\frac{P_{вол}}{F_1}$ можно представить в следующем виде:

$$\frac{P_{вол}}{F_1} = k_n \sigma_S, \quad (5)$$

где σ_S – сопротивление металла пластической деформации,

k_n – безразмерный коэффициент, зависящий от вида осуществляемого процесса деформации, относительных размеров, формы деформируемого металла и условий контактного трения.

Экспериментальное исследование по определению коэффициента трения было реализовано на примере использования реактивного смазочного материала «Dexlube 498», применяемого в действующем технологическом процессе изготовления холоднодеформированных труб Синарского трубного завода. Его использование позволяет исключить стандартную технологическую стадию процесса подготовки труб к холодной деформации – операцию фосфатирования. Также при степени деформации до 45% и скорости волочения до 40-60 м/мин обеспечивается достаточная стабильность процесса оправочного волочения без ухудшения качества труб ввиду отсутствия явления дрожания и налипания металла труб на волочильный инструмент [5].

Для действующих на Синарском трубном заводе маршрутов оправочного волочения котельных труб коэффициент k_n

принимает значения в интервале от 0,81 до 0,86. Таким образом, величина усилия $P_{тр}$ согласно равенству (4) должна находиться в интервале значений от 57,0 до 59,0 Н, а величина прилагаемой внешней нагрузки $P_{вн}$ согласно формуле (3) – в интервале значений от 14,0 и 15,0 Н. Таким образом, экспериментальное исследование проводили при постоянной нагрузке P_2 равной 14,7 Н.

Также, для качественного транспонирования результатов трибометрического эксперимента на реальный процесс волочения обеспечена соизмеримость скоростного режима, величин шероховатости контактных поверхностей и соответствие условий трения.

Соизмеримость скоростей обеспечивали путем задания частоты вращения диска. Согласно технической документации применение смазочного материала «Dexlube 498» ограничено скоростью волочения 40-60 м/мин. Для приближения к линейным скоростям волочения в действующем технологическом процессе Синарского трубного завода частоту вращения диска задавали равной 250 об/мин. Учитывая, что согласно технической характеристике трубоволочильного стана максимальная скорость волочения составляет 75 м/мин, задача по определению коэффициента трения скольжения была расширена: дополнительно было реализовано исследование по определению коэффициента трения скольжения при частоте вращения диска 435 и 1 400 об/мин (согласно технической возможности трибометра).

Соизмеримость величин шероховатости поверхностей трубы и волочильного инструмента с шероховатостью инструмента трибометра обеспечивали путем полирования рабочих поверхностей технологического инструмента трибометра до значений шероховатости $R_a = 0,32$ мкм, что коррелирует с качеством подготовки поверхности трубоволочильного инструмента – твердосплавных волоки и оправки. Измерение ше-

роховатости рабочих поверхностей инструмента реализовано с использованием профилометра Surftest SJ-201.

Соответствие условий трения между контактными поверхностями реализовывали путём использования, применяемого при оправочном волочении труб на Синарском трубном заводе смазочного материала «Dexlube 498» и воспроизведения технологии его нанесения [5].

Результаты исследования влияния частоты вращения диска на коэффициент трения приведены в таблице 1 в виде средних

значений коэффициентов трения в установленном режиме и на рисунке 3 в виде эмпирических кривых зависимости изменения коэффициента трения скольжения от времени.

Таблица 1. Средние значения коэффициента трения f в зависимости от частоты вращения диска ω

ω , об/мин	250	435	1 400
\bar{f}	0,0845	0,0610	0,0228

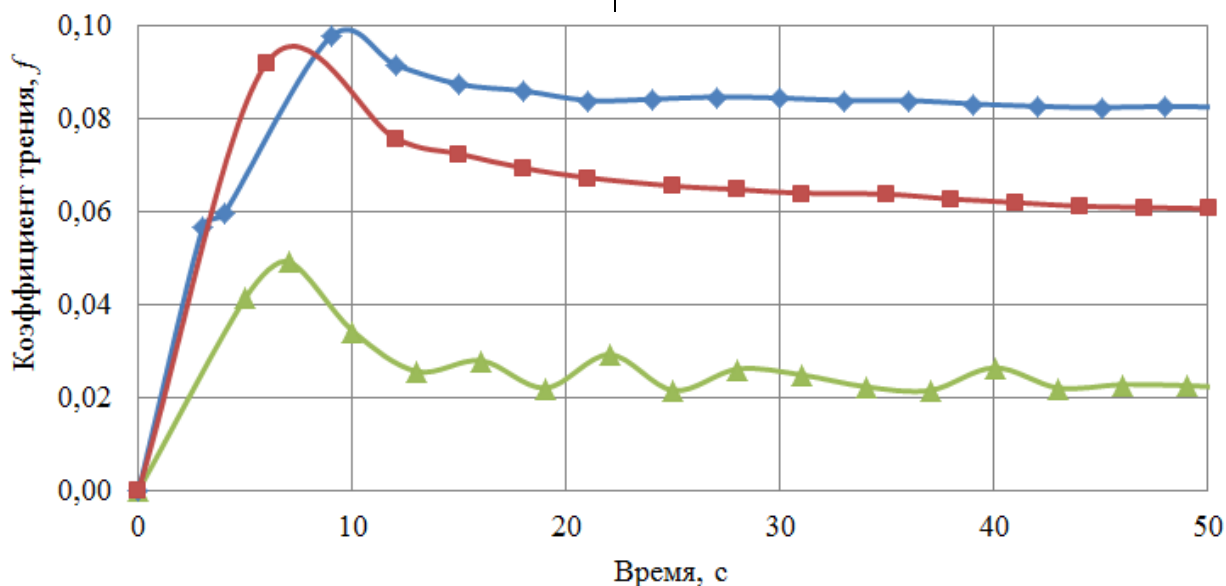


Рисунок 3. Эмпирические кривые зависимости изменения коэффициента трения скольжения f при величине $P_2 = 14,7$ Н и различной частоте вращения диска ω :

— $\omega=250$ об/мин; — $\omega=435$ об/мин; — $\omega=1400$ об/мин

Анализ экспериментальных данных показал, что почти при шестикратном увеличении частоты вращения диска коэффициент трения скольжения при использовании смазочного материала «Dexlube 498» в среднем уменьшается в 3,7 раза: от 0,0845 до 0,0228. При переходе к линейным скоростям получена эмпирическая скоростная зависимость изменения коэффициента трения (см. рисунок 4), характер которой согласуется с имеющейся в литературе информацией [6].

Используя резервы по увеличению скорости волочения на Синарском трубном заводе и полученную скоростную зависимость изменения коэффициента трения для смазочного материала «Dexlube 498» показано, что при скорости волочения 70 м/мин

коэффициент трения составит 0,0507. С использованием оригинальной математической модели определения напряженно-деформированного состояния при волочении [7] была выполнена численная оценка усилия волочения и действующих на волоку и оправку давлений при изменении коэффициента трения с 0,0845 до 0,0507. Согласно результатам численной оценки показано, что для самого напряженного маршрута изготовления труб способом оправочного волочения на Синарском трубном заводе уменьшение контактных давлений на технологический инструмент составит до 40% (см. рисунок 5), а усилия волочения — до 5%.

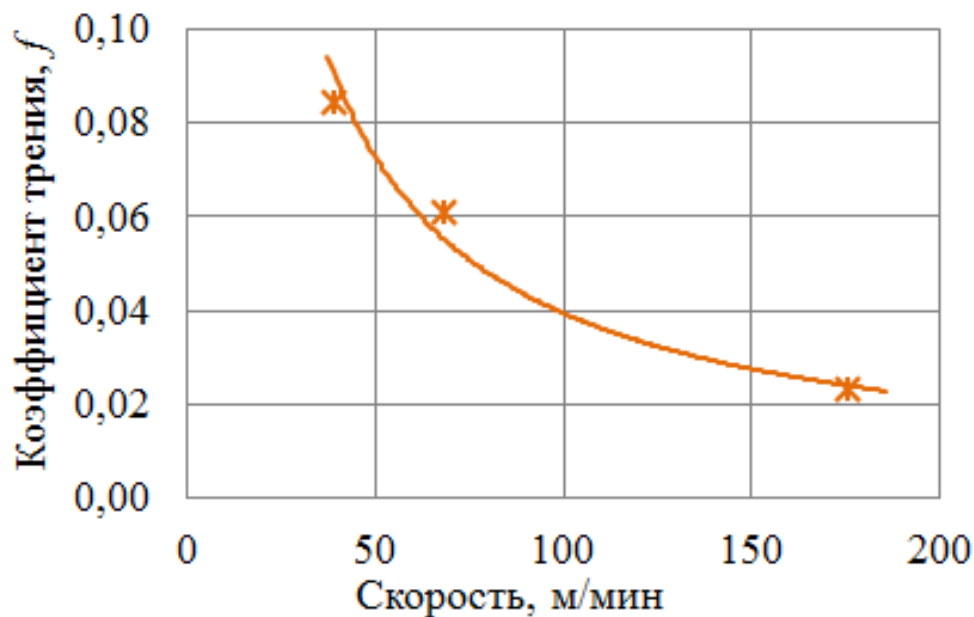


Рисунок 4. Эмпирическая скоростная зависимость изменения коэффициента трения при использовании смазочного материала «Dexlube 498»

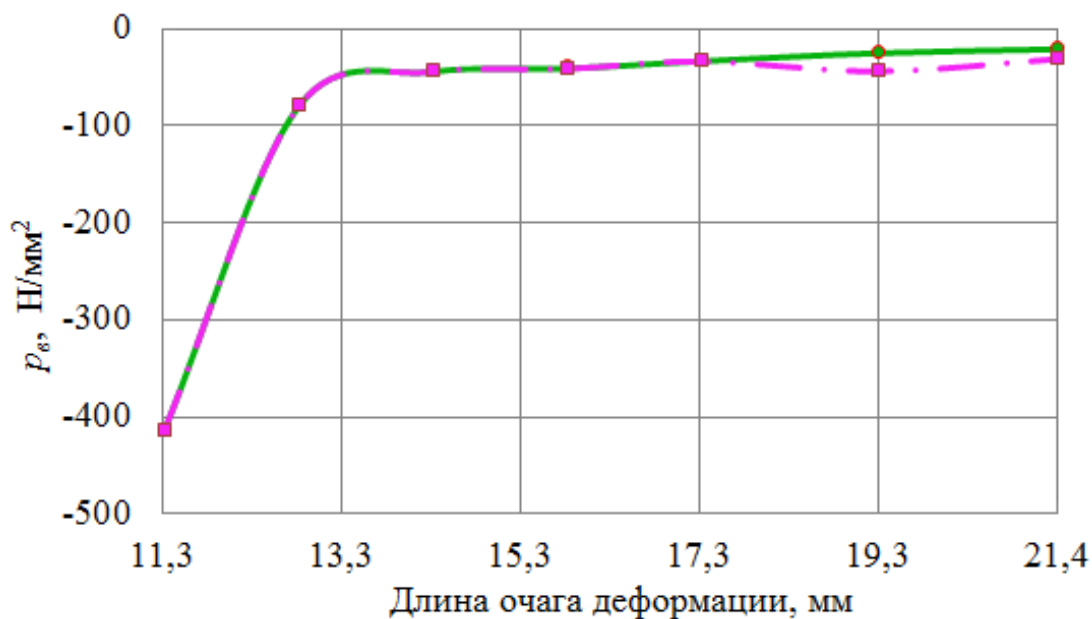


Рисунок 5. Распределение по длине очага деформации расчетных контактных давлений на волоку при увеличении скорости волочения

Результаты данной работы были использованы для численного исследования эффективности технологических маршрутов оправочного волочения котельных труб наружным диаметром от 28 до 80 мм и толщиной стенки от 2 до 10 мм из углеродистой стали марок 10, 20, 12Х1МФ и др. на Синарском трубном заводе. Оценка была выполнена с использованием коэффициента запаса прочности переднего конца

трубы при волочении K_3 . Коэффициент запаса K_3 представляет собой отношение истинного предела текучести стали σ_m к напряжению волочения $\sigma_{вол}$ [8]:

$$K_3 = \frac{\sigma_m}{\sigma_{вол}} \quad (6)$$

Для осуществления процесса волочения K_3 должен быть более 1,0. При этом значения

K_3 , близкие к 1,0 приводят к обрыву, увеличивая простои и уменьшая производительность. Значения K_3 , много большие 1,0 свидетельствуют о недостаточном использовании ресурса пластичности и также уменьшении производительности [8].

Расчет силовых параметров оправочного волочения был выполнен с использованием разработанной математической модели [7], где коэффициенты трения на контактных поверхностях волоки и оправки с металлом трубы заданы согласно результатам проведенного экспериментального исследования.

Заключение

На основе численного анализа технологических маршрутов оправочного волочения котельных труб на Синарском трубном заводе сделаны следующие выводы. Действующие технологические режимы оправочного волочения котельных труб несовершенны – для установившегося процесса волочения тонкостенного сортамента расчетный K_3 составил 1,05. Данный факт свидетельствует о повышенной степени вероятности нарушения стабильности процесса волочения и необходимости уменьшения разовых деформации, что приведет к снижению производительности. При увеличении скорости волочения до 70 м/мин расчетный коэффициент K_3 увеличится до 1,24, что позволит сократить обрывы и связанные с этим простои, а совместно с уменьшением машинного времени стана – позволит увеличить производительность до 4 000 т/год. В свою очередь уменьшение коэффициента трения приведет к увеличению стойкости волочильного инструмента и соответственно уменьшению себестоимости труб. Таким образом за счет расширения диапазона применимости смазочного материала «Dexlube 498» имеется возможность повышения эффективности действующей технологии изготовления холоднодеформированных труб.

Библиографический список

1. Стасовский Ю.Н., Лукаш И.Н. Организационно-технологическая схема производства прецизионных труб целевого назначения в условиях мини-производства / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – №6. – С. 59-65.
2. Аронович А.В., Носарь В.Д., Сокурченко В.П. и др. Эффективные смазки для волочения прецизионных труб для цилиндров амортизаторов автомобилей / *Сталь*. – 1995. – №1. – С. 40-43.
3. Патент 2524298 Российская Федерация, МПК С 23 С 22/05, С 23 С 22/73. Способ химической обработки труб из углеродистых и низколегированных марок стали перед волочением / Грехов А.И., Гончаров В.С., Дегтярев А.В. и др. – №2012124310/02; заявл. 13.06.2012; опубл. 27.07.2014. Бюл. №21.
4. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
5. Чертавских А.К., Белосевич В.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: *Металлургия*, 1968. – 364 с.
6. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник. – М.: *Металлургия*, 1982. – 312 с.
7. Выдрин А.В., Яковлева К.Ю. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении труб на самоустанавливающейся оправке на основе совместного применения проекционного метода и метода конечных элементов / *Производство проката*. – 2016. – №1. – С. 26–33.
8. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: *Металлургия*, 1971. – 448 с.