

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.774.3

Пивоварова К.Г., Тагирова В.М.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ ВОЛОЧИЛЬНЫХ СМАЗОК, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВАНИЯ ПРОКАТА ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. В статье исследуются трибологические и термоокислительные характеристики жидких волоочильных смазок, применяемых при калибровании проката после дробеструйной обработки поверхности. Данный метод подготовки исключает использование традиционных подсмазочных покрытий (фосфатных, борированных), что делает жидкую смазку единственным барьером, предотвращающим износ инструмента и формирующим качество поверхности изделия. В условиях экстремальных давлений, высоких скоростей волочения и значительного тепловыделения работоспособность смазки определяется её способностью формировать стабильную граничную плёнку с низким коэффициентом трения и высокой несущей способностью, а также устойчивостью к термическому разложению и окислению. Проведён анализ компонентного состава современных смазок, включающего базовые масла (минеральные, синтетические сложные эфиры, водные эмульсии) и пакеты противоизносных (AW) и противозадирных (EP) присадок на основе хлора, серы и фосфора. Показано, что наибольшей эффективностью обладают синтетические сложные эфиры, характеризующиеся высокой полярностью, обеспечивающей прочную адгезию к металлу, и повышенной термоокислительной стабильностью. Для объективной оценки свойств смазок применяется комплекс методик: трибометрические испытания на четырёхшариковой машине (определение показателя износа, критической нагрузки задира и нагрузки сваривания) и анализ термической стабильности методами дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ). На примере конкретных смазочных материалов («Политрен ХП-16», «Multidraw AL WM») продемонстрированы их критические температурные пороги, определяющие пригодность для скоростного калибрования.

Ключевые слова: калиброванный прокат, волочение, дробеструйная обработка, жидкие волоочильные смазки, трибологические характеристики, термоокислительная стабильность, противоизносные присадки, противозадирные присадки, дифференциально-сканирующая калориметрия, термогравиметрия

В условиях роста требований к качеству калиброванного проката, особенно в автомобилестроении и машиностроении, где критичны размерная точность, шероховатость и отсутствие поверхностных дефектов (задиры, рисок), особое значение приобретает оптимизация процесса волочения – ключевого передела, формирующего как геометрию, так и структурно-механические свойства изделия [1]. Все эти параметры напрямую зависят от условий трения и теплоотвода в очаге деформации, а значит – от трибологических и термоокислительных характеристик применяемой смазки.

Производство калиброванного проката основано на процессе волочения с малыми обжатиями (калибрование) горячекатаной или термически обработанной заготовки, предварительно подвергнутой травлению или механической поверхностной обработке (дробеструйная, дробеметная и др.). В частности, при механическом удалении окалины на поверхности заготовки формируется более развитый, чем после травления, микрорельеф [2].

Калибрование после дробеструйной обработки исключает применение традиционных подсмазочных покрытий (фосфаты, бура и др.). Это делает жидкие смазки единственным источником граничного (или в идеале – почти гидродинамического) смазывания в очаге деформации [3, 4]. В этих условиях эффектив-

ность смазки определяется не только её составом (базовое масло + присадки), но и её способностью выдерживать экстремальные трибологические и термические нагрузки [5]. При превышении термоокислительного предела смазки происходит её деструкция (разложение): рост кислотного числа, снижение вязкости, образование смол и осадков, что неминуемо приводит к разрушению смазочной плёнки, переходу в режим сухого трения и появлению дефектов.

Дробеструйная обработка устраняет окалину и создаёт равномерно шероховатую поверхность, но не формирует пористой структуры, как при фосфатировании, и потому не обеспечивает удержание смазки. В этих условиях необходима высокая адгезия смазки к металлу (полярность, поверхностная активность) [3].

Основу современных жидких смазок для калибрования после дробеструйной обработки составляют базовые масла (минеральные, синтетические или водные эмульсии) и различные функциональные присадки, придающие смазке граничные смазывающие свойства.

Наиболее эффективными с точки зрения трибо- и термостабильности являются синтетические сложные эфиры, например Multidraw AL WM [6]. Их преимущество обусловлено:

– высокой полярностью молекул, обеспечивающей прочную адсорбцию на металлической поверхности;

- отсутствием низкомолекулярных фракций, испаряющихся в зоне деформации;

- высокой термоокислительной стабильностью.

В результате использования синтетических сложных эфиров температура поверхности проволоки на выходе из волоки удерживается менее 30 °С, что является критерием стабильной работы смазки и эффективного теплоотвода [6].

Минеральные масла (например, Multipress РЕК с противозадирными присадками) широко применяются благодаря низкой стоимости, однако уступают синтетическим маслам по коэффициенту трения и термостабильности [6].

Соединения, содержащие хлор, серу, фосфор, используются в качестве противоизносных (AW) и противозадирных (EP) присадок [7]. Механизм действия заключается в формировании хемосорбированных или реакционных (сульфидных, фосфидных, хлоридных) плёнок толщиной 10–100 нм на поверхности металла при достижении пороговой температуры активации присадки. Эти плёнки обладают низким сдвиговым сопротивлением и высокой несущей способностью, предотвращают локальное схватывание и переход в режим сухого трения.

AW/EP-присадки входят в состав жидких волоочильных смазок, применяемых после дробеструйной обработки. Наиболее распространены присадки на основе:

- хлора (например, Росойл-101М, Политрен ХП-16);

- фосфора (например, EXTRUDOIL 702F).

Важно отметить, что эффективность присадки зависит от базового масла и режима трения. Например, в условиях гидродинамического смазывания присадки менее востребованы, и ключевым становится вязкостно-температурное поведение базового масла [6]. В то же время при высоких обжатиях в стандартных монолитных волокнах именно EP-присадки определяют предел работоспособности смазки.

Трибологические свойства – ключевой критерий пригодности смазки для волочения калиброванного проката после дробеструйной обработки, когда отсутствие подмасочного покрытия делает смазку единственным барьером между деформируемым металлом и поверхностью волоки [5]. В таких условиях способность смазки сохранять несущую способность и обеспечивать стабильное граничное или гидродинамическое смазывание определяет не только усилие деформации, но и качество поверхности, износ инструмента и остаточные напряжения в изделии.

Трибологические свойства волоочильных смазок определяют по ГОСТ 9490-75 на четырехшариковой машине, оценивая:

- показатель износа – диаметр пятна износа при заданной нагрузке и времени; чувствителен к противоизносным присадкам;

- критическую нагрузку задира – нагрузка, при которой резко возрастает сила трения из-за разрушения смазочной плёнки;

- нагрузку сваривания – нагрузка, при которой происходит схватывание шариков; по нагрузке сваривания судят о пределе несущей способности поверхностно-активных веществ в смазочном материале и способности масла предотвращать возникновение задира трущихся поверхностей.

Термоокислительная стабильность определяет способность жидкой смазки сохранять свои физико-химические и трибологические свойства при длительном воздействии высоких температур и кислорода, что неизбежно возникает в очаге деформации при калибровании после дробеструйной обработки [8]. Физический смысл показателя заключается в том, что он характеризует сопротивляемость смазочного материала окислению и испарению, поэтому чем меньше значение этого показателя, тем выше термоокислительная стабильность смазочного материала.

Процесс калибрования сопровождается значительным тепловыделением двумя путями: пластической деформацией и трением на границе «заготовка–волока» [9]. Нагрев металла от работы деформации очень высок. Это может привести к деструкции смазочного материала, которое сопровождается [8]:

- ростом кислотного числа – продукты окисления (органические кислоты) агрессивны к поверхности инструмента и могут вызывать коррозионно-механический износ;

- снижением вязкости – уменьшение несущей способности смазочной плёнки;

- образованием смол и осадков – приводит к засорению каналов подачи смазки, нарушению её равномерного распределения на поверхности протягиваемого металла.

В результате происходит переход в режим нестабильной граничной или даже сухой смазки, рост коэффициента трения, появление «блестящего металла», задиры, риски и других поверхностных дефектов, что негативно сказывается на качестве поверхности калиброванного проката.

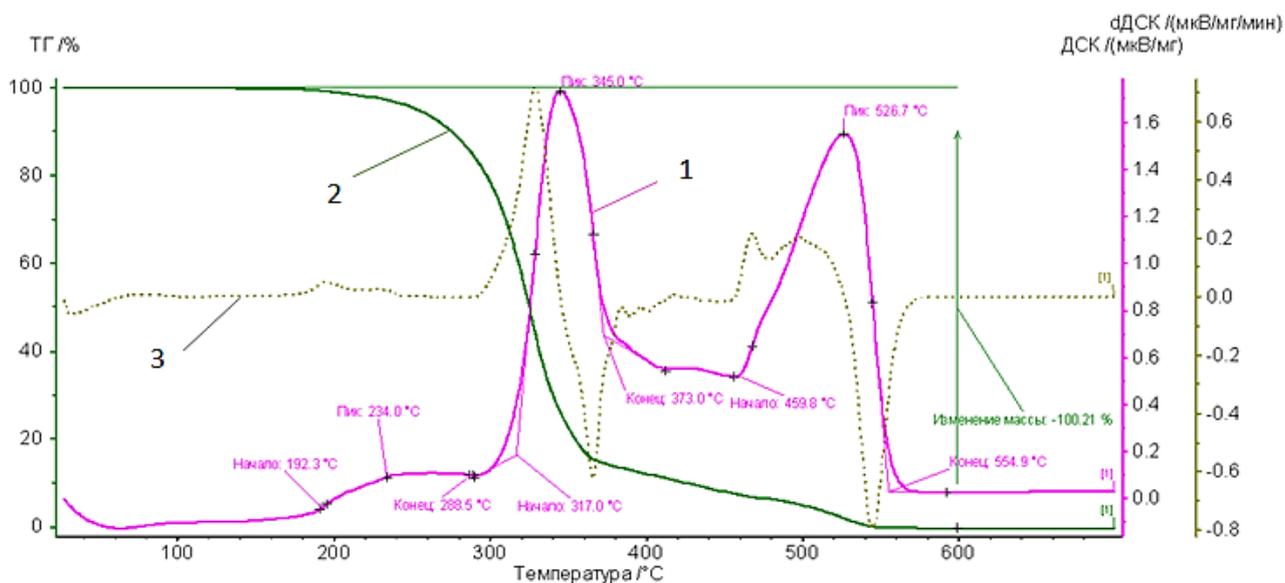
Для оценки термоокислительной стабильности смазок применяют следующие методы: термогравиметрический анализ (ТГ) и дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК). Термоокислительную стабильность оценивают по температуре, при которой наблюдаются 5%-е потери массы образца смазки, термостойкость – по температуре начала окисления смазочного материала [3,10].

Например, для смазки Политрен ХП-16 [3]:

- $T_{ox} = 192^{\circ}\text{C}$ (ДСК, O_2 , 10 °С/мин);

- $T_{5\%} = 260\text{C}$ (ТГ, 20 °С/мин, воздух) (см. рисунок).

Это позволяет рекомендовать её для скоростного калибрования до 20 м/с при условии эффективного охлаждения инструмента.



Термограмма технологической смазки Политрен ХП-16 [3]:
 1 – кривая ДСК (экзотермический пик окисления при 192°С);
 2 – кривая ТГ (5%-я потеря массы при 260°С); 3 – кривая dДСК

Синтетическое масло Multidraw AL WM демонстрирует ещё более высокую стабильность: в тех же условиях $T_{\text{ox}} > 210^{\circ}\text{C}$, а температура поверхности проволоки удерживается менее 30°C , что является прямым признаком отсутствия деструкции смазки [6].

Заключение

1. Эффективность процесса калибровки проката после дробеструйной обработки, исключающей применение традиционных подсмазочных покрытий, в решающей степени определяется свойствами жидкой технологической смазки. Именно она становится единственным барьером, предотвращающим износ и задиры, и обеспечивающим качество поверхности.

2. Работоспособность смазки в условиях экстремальных давлений, высоких скоростей волочения (до 20 м/с) и температур в очаге деформации (до 250°C и выше) определяется двумя группами свойств: трибологическими свойствами (способность формировать стабильную граничную пленку с низким коэффициентом трения и высокой несущей способностью, что напрямую влияет на усилие волочения, износ инструмента и шероховатость поверхности) и термоокислительной стабильностью (способность противостоять термическому разложению и окислению).

3. Наибольшей эффективностью обладают синтетические базовые масла (например, сложные эфиры), характеризующиеся высокой полярностью, термостабильностью и отсутствием легколетучих фракций. Противозносные (AW) и противозадирные (EP) присадки на основе хлора, серы и фосфора являются необходимым компонентом для формирования реакционных пленок, предотвращающих схватывание в условиях граничного трения.

4. Комплексная методика, сочетающая триболометрические испытания (на четырехшариковой машине) и анализ термической стабильности (ДСК/ТГ), позволяет объективно оценить и прогнозировать поведение смазочных материалов в реальных производственных условиях.

Список источников

1. Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г., Ульянов А.Г. Технологические аспекты производства высокопрочной калиброванной стали // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2012. № 38. С. 85-89.
2. Особенности проектирования режимов волочения калиброванного проката после дробеструйной обработки поверхности / Д.П. Канаев, А.Ю. Столяров, А.Г. Корчунов, Д.В. Константинов, М.В. Зайцева // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2022. Т. 20. № 5. С. 223-229.
3. Пивоварова К.Г., Корчунов А.Г., Тагирова В.М. Влияние эксплуатационных свойств технологической смазки на качество поверхности калиброванного проката после дробеструйной обработки // *Черные металлы*. 2024. № 6(1110). С. 26-30.
4. Кальченко А.А., Пащенко К.Г., Кургузов С.А. Волочение проволоки в режиме жидкостного трения // *Теория и технология металлургического производства*. 2020. №1(32). С. 26-30.
5. Трение и смазки при волочении проволоки в монолитных волоках: учебное пособие / В.А. Харитонов, М.Ю. Усанов, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2025. 293 с.
6. Del Rey J. C. et al. Effect of Die Design and Lubricant on ZnAl15% Wire Drawing: An Experimental

- Approach with Pressure/Hydrodynamic and Conventional Drawing Dies. *Lubricants*. 2025;13(11):481.
7. Медведева В.В. Повышение триботехнических характеристик консистентных смазочных материалов путем применения дисперсных частиц гидросиликатов магния: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Медведева. С.-Петербург, 2018. 143 с.
 8. Huang M. et al. Investigation into friction and wear characteristics of 316L stainless-steel wire at high temperature. *Materials*. 2022;16(1):213.
 9. Santos T. et al. Experimental-numerical analysis to determine the efficiency of industrial lubricants in wire drawing process. *Revista de Metalurgia*. 2023. 59(1):e234.
 10. Результаты апробации метода определения показателей термоокислительной стабильности смазочных масел / Б.И. Ковальский, В.Г. Шрам, О.Н. Петров, А.Н. Сокольников, Д.В. Агровиченко // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 1. С. 139-144.

Сведения об авторах

Пивоварова Ксения Григорьевна – д-р техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением им. М.И. Бояршинова, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kgpivovarova@gmail.com, +79068544143

Тагирова Венера Марсовна – аспирант кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: odinaeva.vm@mmk-metiz.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

TRIBOLOGICAL AND THERMO-OXIDATIVE CHARACTERISTICS OF LIQUID DRAWING LUBRICANTS USED FOR CALIBRATING ROLLED PRODUCTS AFTER SHOT BLASTING

Pivovarova Ksenia G. – DrSc(Eng.), docent, professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kgpivovarova@gmail.com

Tagirova Venera M. – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: odinaeva.vm@mmk-metiz.ru

Abstract. The article investigates the tribological and thermo-oxidative characteristics of liquid drawing lubricants used in the calibration of rolled products after surface shot blasting. This preparation method eliminates the use of traditional sub-lubricant coatings (phosphate, borated), making the liquid lubricant the only barrier that prevents tool wear and forms the product's surface quality. Under conditions of extreme pressure, high drawing speeds, and significant heat generation, the lubricant's performance is determined by its ability to form a stable boundary film with a low friction coefficient and high load-carrying capacity, as well as its resistance to thermal decomposition and oxidation. An analysis of the component composition of modern lubricants is carried out, including base oils (mineral, synthetic esters, aqueous emulsions) and packages of anti-wear (AW) and extreme pressure (EP) additives based on chlorine, sulfur, and phosphorus. It is shown that synthetic esters are the most effective, characterized by high polarity, which ensures strong adhesion to metal, and increased thermo-oxidative stability. A set of methods is used for the objective assessment of lubricant properties: tribometric testing on a four-ball machine (determination of wear index, seizure load, and weld load) and analysis of thermal stability by differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetry (TG). Using specific lubricants ("Politren HP-16", "Multidraw AL WM") as examples, their critical temperature thresholds, which determine suitability for high-speed calibration, are demonstrated.

Keywords: calibrated rolled products, drawing, shot blasting, liquid drawing lubricants, tribological characteristics, thermo-oxidative stability, anti-wear additives, extreme pressure additives, differential scanning calorimetry, thermogravimetry

Ссылка на статью:

Пивоварова К.Г., Тагирова В.М. Триботехнические и термоокислительные характеристики жидких волоочильных смазок, применяемых для калибрования проката после дробеструйной обработки // Теория и технология металлургического производства. 2025. №4(55). С. 20-23.
 Pivovarova K.G., Tagirova V.M. Tribological and thermo-oxidative characteristics of liquid drawing lubricants used for calibrating rolled products after shot blasting. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 55, no. 4, pp. 20-23.