

В. Ф. Балакин /д. т. н./

Национальная металлургическая академия

Украины, г. Днепро, Украина

А. Ю. Салей, В. В. Кошиль

ООО «ЗЦМ», г. Бахмут, Украина

e-mail: ax.salej@gmail.com

## Методика и результаты испытаний смазочных материалов для определения применяемости в процессе прокатки медных труб на станах холодной прокатки труб

V. F. Balakin /Dr. Sci (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro,  
Ukraine

A. Yu. Salej, V. V. Koshil

«ZCM» Ltd, Bakhmut, Ukraine

e-mail: ax.salej@gmail.com

## The methodology and results of lubricant tests for determining the applicability of the rolling process in the copper pipes for cold rolling mills pipes

**Цель.** Подбор смазочных материалов для применения в технологическом процессе производства медных холоднокатаных труб путём прокатки на станах типа ХПТ – очень важный аспект планирования технологии производства, потому что применяемый смазочный материал оказывает огромное влияние как на энергосиловые параметры прокатки, так и на качество конечного продукта. Проверка смазочных материалов путём непосредственного применения их в условиях холодной периодической прокатки экономически нецелесообразно ввиду возможного увеличения доли некачественной продукции и энергозатрат при производстве данной продукции.

**Методика.** Описанная в статье методика испытания смазочных материалов позволяет проверить смазочный материал на применяемость к условиям прокатки холоднокатаных медных труб в лабораторных условиях с параметрами, близкими к тем, которые имеют место в очаге деформации при прокатке на стане ХПТ. Важно, что экономические затраты при испытании смазочных материалов по разработанной методике минимальны.

**Результаты.** В статье приведены результаты проведения исследования смазочных материалов, полученные в процессе деформации образцов из меди (сплав М1) в наковальнях Бриджмена. Условия проведения и численные значения параметров приближены к тем, которые имеют место в очаге деформации при прокатке медных труб на станах ХПТ.

**Научная новизна.** Подтверждена возможность испытания смазочных материалов путем испытания смазочных материалов в наковальнях Бриджмена.

**Практическая значимость.** Развитие теории исследования методологии применяемости смазочных материалов к условиям холодной периодической прокатки труб из меди и медных сплавов. (Ил. 14. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.)

**Ключевые слова:** холодная периодическая прокатка, технологическая смазка, медные трубы, деформация, методика, испытания.

**Постановка проблемы.** Изготовление медных труб – важное направление производства в области цветной металлургии и тяжелой промышленности в целом. Холоднодеформированные трубы занимают большой удельный вес в производстве бесшовных труб. Такие трубы отличаются большой точностью геометрических размеров и высоким качеством поверхности [9].

Трубы из меди и медных сплавов находят своё применение в машиностроительной и энергетической отраслях промышленности. Мировое потребление холоднокатаных медных труб составляет более 5 млн т в год, лидирующие позиции в производстве занимают следующие страны (рис. 1) (приведенная статистика – по состоянию на 2012 г.) [1]:



Рис. 1. Мировое потребление медных труб

Разработано автором.

Классическая схема производства труб из меди и медных сплавов включает в себя ряд следующих этапов производства:

- прессование круглых слитков на гидравлических прессах усилием 1,5 МН и более;
- правка трубной заготовки и обрезка концов;
- промасловка внутренней и наружной поверхности трубной заготовки;
- прокатка на станах ХПТ (ХПТ – стан холодной прокатки труб);
- резка в мерные длины, отжиг в защитной атмосфере (в большинстве случаев медные трубы отжигаются в азотной, азотно-водородной безокислительной среде) и передача на склад или волочение на цепных или барабанных волочильных станах.

Требования, предъявляемые к трубам из меди и медных сплавов, изложены в Европейских (EN12451:1999 – Бесшовные трубы круглого сечения для теплообменников) и Межгосударственных стандартах (ГОСТ 21646-2003 – Трубы медные и латунные для теплообменных аппаратов). Среди основных требований, предъявляемых к бесшовным трубам из меди и медных сплавов, – временное сопротивление (кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение после разрыва (%), геометрические размеры, величина зерна, химический состав, также существуют и дополнительные требования, такие как требования к чистоте поверхности (ГОСТ 21646-2003 п. 4.5. Наружная и внутренние поверхности труб должны быть без загрязнений, затрудняющих осмотр; EN12451:1999 п. 6.4. Наружные и внутренние поверхности должны быть чистыми и гладкими) [5–8]. Достижение высокого качества бесшовных холоднокатаных медных труб невозможно без применения смазок. Ведущие мировые разработчики и производители технологических смазок (Chemetall, Shell, Mobil Exxon, Bechem Lubrication, Q8 Oils, Fuchs) для холодной обра-

ботки металлов давлением, в частности для прокатки труб, свои рекомендации по применению смазки обосновывают результатами натуральных экспериментов. При этом процессы, используемые в эксперименте, не всегда совпадают с процессами промышленного производства. Так, например, Chemetall использует процесс безоправочного волочения и штамповки колпачка на прессе. Подбор смазочных материалов непосредственно в процессе прокатки без научно обоснованной методики приводит к серьезным экономическим потерям.

**Фактический материал.** Использование смазок обычно преследует несколько целей, что определяет основные функциональные требования, предъявляемые к технологическим смазочным материалам [2]:

1. снижение сил трения на контакте;
2. уменьшение износа инструмента;
3. обеспечение чистоты и оптимальной шероховатости поверхности изделий;
4. предотвращение налипания металла на инструмент;
5. снижение теплопередачи между деформируемым металлом и инструментом;
6. уменьшение окисления металла;
7. обеспечение более равномерного распределения деформации по объему деформируемого тела.

Важно отметить, что трение – один из важнейших параметров, от которого зависят энергосиловые и кинематические параметры формоизменения, из этого следует, что в процессе прокатки особую роль играют силы внешнего (контактного) трения [3]. Косвенно, а иногда и прямо, трение влияет на качество поверхности готовых изделий, себестоимость продукции и производительность процессов ОМД [10].

**Изложение основных материалов исследования.** Проблема испытания и подбора смазочных материалов или их комбинаций, необходимых для использования в процессе холодной периодической прокатки, состоит в необходимости повторения условий трения и контактных напряжений, численно близких к тем, что имеют место в очаге деформации при прокатке на стане ХПТ. В связи с этим целесообразно осуществление деформации сплава с исследуемой смазкой на поворотных наковальнях Бриджмена (два вертикально расположенных конических пуансона) в качестве моделирующего процесса (рис. 2).

Применение такой системы позволяет про- извести разделение деформирующего воздействия на вертикально прилагаемое усилие и

## ТРУБНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

усилие, необходимое для поворота верхнего пуансона. Для воссоздания очага деформации необходимо повторить численные значения условий деформации, а именно:

- контактное напряжение;
- скорость относительного перемещения металла по инструменту;
- шероховатость образца и инструмента.

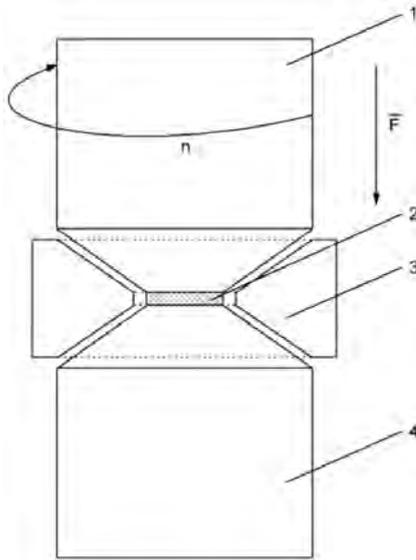


Рис. 2. Схема расположения деформирующего инструмента и образца в наковальнях Бриджмена, где  $F$  - вектор прилагаемой силы, а  $n$  - угол поворота (1 - верхний поворотный пуансон, 2 - образец, 3 - упорное кольцо, ограничивающее диаметр деформируемого образца в горизонтальной плоскости, 4 - нижний неподвижный пуансон)

Разработано автором.

Создание такой модели позволит произвести сравнительный анализ данных, полученных во время испытания смазочных материалов при проведении прокатки и при деформации образцов в наковальнях Бриджмена. При этом метод моделирования пластической деформации в наковальнях Бриджмена не требует больших объемов металла.

Для исследования были подготовлены дискообразные образцы диаметром 9 мм и толщиной 0,8 мм. Шероховатость, твердость образцов должна быть близкой (отличающейся не более чем на 3 %) к параметрам заготовки, которая использовалась для прокатки на стане ХПТ. Химический состав сплава тот же, что и для прокатки. Такое приближение в параметрах позволит исключить влияние факторов, размерное значение которых определить невозможно.

Важным фактором проведения эксперимента является метрологическое обеспечение, структурная схема которого приведена на рис. 3. Для получения максимальной информативности измерения необходимо, чтобы измерения по параметрам (давление, прилагаемое к пуансону, сила, прилагаемая для поворота пуансона) происходили одновременно не реже 1 раза в секунду, при этом опрос первичных приборов (датчиков) происходит 1 раз в 100 мс (регистрируется среднее значение за 1 секунду). Абсолютная погрешность измерения давления и усилия поворота пуансона составляет не более 1 %. Для исключения влияния скорости обработки данных, вызванных операционной системой персонального компьютера, регистрация производилась на внешний цифровой блок регистрации

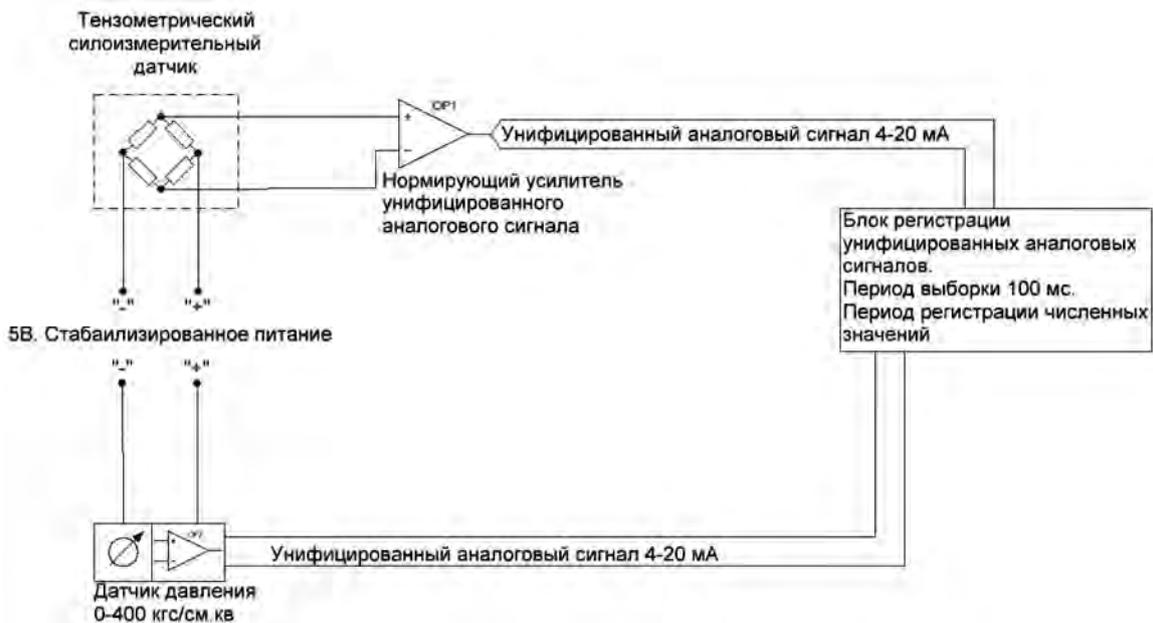


Рис. 3. Схема системы регистрации параметров Эксперимента

Разработано автором.

унифицированных аналоговых сигналов «ОВЕН СП1270». В составе первичных преобразователей: датчик давления (Honeywell, P = 0–400 бар, выходной сигнал 4–20 мА линейный), силоизмерительный датчик (Keli, m = 0–100 кг, коэффициент передачи сигнала 2 мВ/В). Для преобразования сигнала силоизмерительного датчика в унифицированный аналоговый сигнал с диапазоном 4–20 мА используется блок преобразования «Микрол. БПТ-22».

Во избежание влияния остатков смазочных материалов на процесс деформации пуансоны и образцы обезжириваются спиртом перед нанесением каждого нового вида смазки. После проведения эксперимента каждый образец помещался в отдельный промаркированный контейнер. Поворот верхнего пуансона производился за 6 последовательных поворотов по 60 градусов, до полного поворота на 360 градусов. Давление, устанавливаемое в плунжере гидравлического пресса, – 5 МПа, что составляло 1912 МПа (при площади образца 63,62 мм<sup>2</sup>). Таким образом, были произведены испытания различных смазочных материалов в условиях пластической деформации, численно сопоставимой с параметрами в очаге деформации при прокатке на стане ХПТ.

Основные этапы исследования полученных образцов:

- анализ и сопоставление зарегистрированных параметров давления пресса и усилия поворота в динамике изменения времени;
- анализ макроструктуры поверхности с использованием оптического микроскопа;
- измерение шероховатости поверхности при помощи профилометра.

Сравнительный анализ параметров (численных значений параметров) позволил установить закономерности влияния смазочных материалов на силовые параметры осуществления процессов и качество поверхности при деформации в наковальнях Бриджмена и, как следствие, при периодической прокатке труб. Сопоставление численных значений параметров, полученных при деформации образцов с нанесением различных смазок, позволяет выявить смазку, которая максимально эффективно снижает силы трения в очаге деформации и улучшает качество поверхности.

Эксперименты по деформации образцов производились в наковальнях Бриджмена в лаборатории кафедры технологического проектирования НМетАУ на прессе усилием 100 тс.

В соответствии с разработанной методикой проведён сравнительный анализ давления на плунжере пресса с усилием поворота верхнего пуансона (рис. 4–8).

Температура в помещении лаборатории во время проведения эксперимента составляла +18 °С.

Регистрация показаний производилась с использованием разработанной измерительной системы на флеш-накопитель.

Каждая из исследуемых смазок была залита в отдельный маркированный контейнер.

Шероховатость образцов (Ra) перед деформацией – 0,9 мкм +/- 5 %.

Результаты изменения удельного давления на поверхности образцов и усилия поворота пуансона на пяти исследованных смазках представлены на рис. 4–8.



**Рис. 4. График изменения удельного давления на поверхность образца и усилия во время поворота пуансона (Образец № 1. Смазка Mobil Prosol 67)**

Разработано автором.



Рис. 5. График изменения удельного давления на поверхность образца и усилия во время поворота пуансона (Образец № 2. Смазка Fuchs – Renoform KM)

Разработано автором.

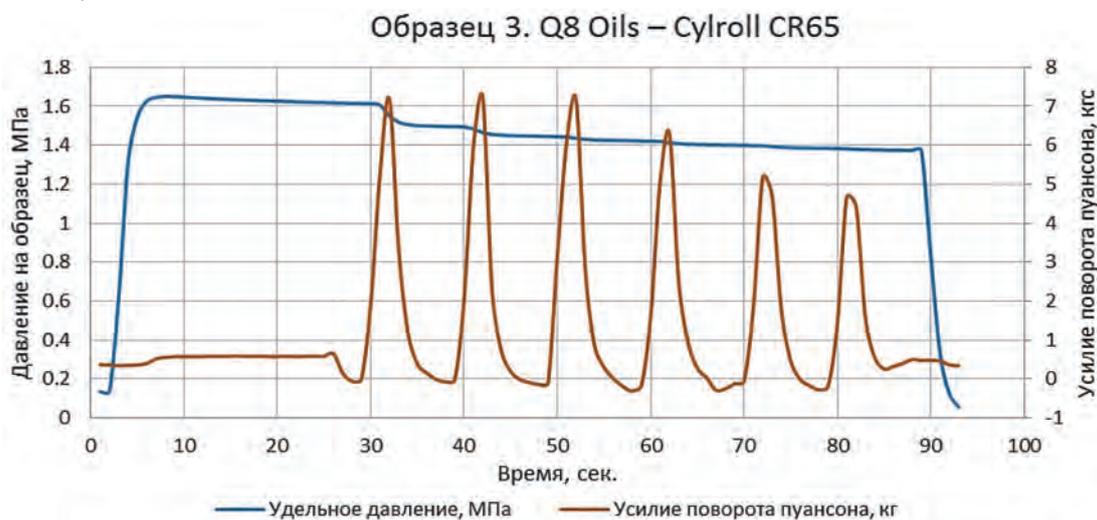


Рис. 6. График изменения удельного давления на поверхность образца и усилия во время поворота пуансона (Образец № 3. Смазка Q8 Oils – Cylroll CR65)

Разработано автором.

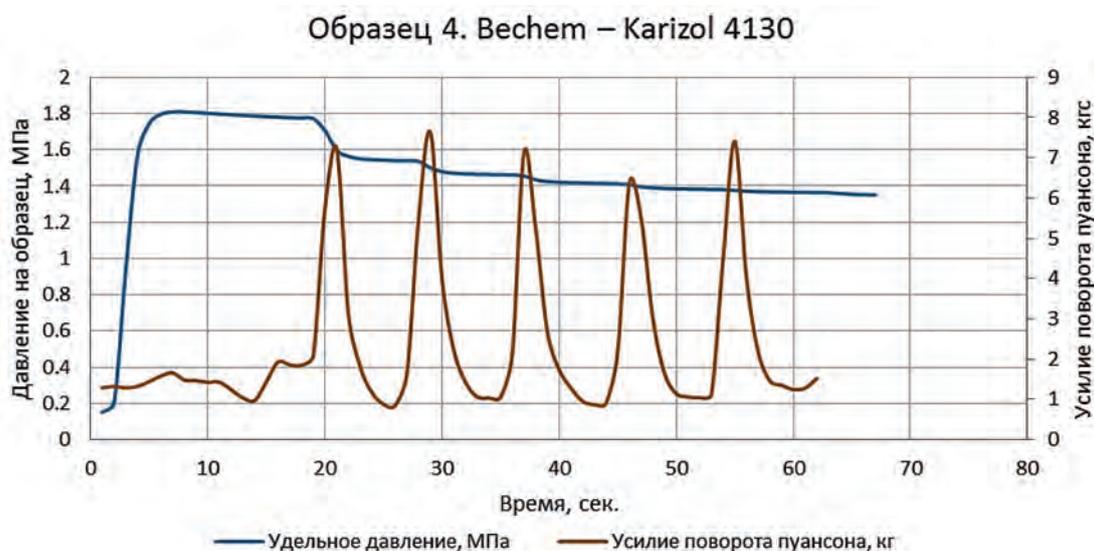


Рис. 7. График изменения удельного давления на поверхность образца и усилия во время поворота пуансона (Образец № 4. Смазка Bechem – Karizol 4130)

Разработано автором.

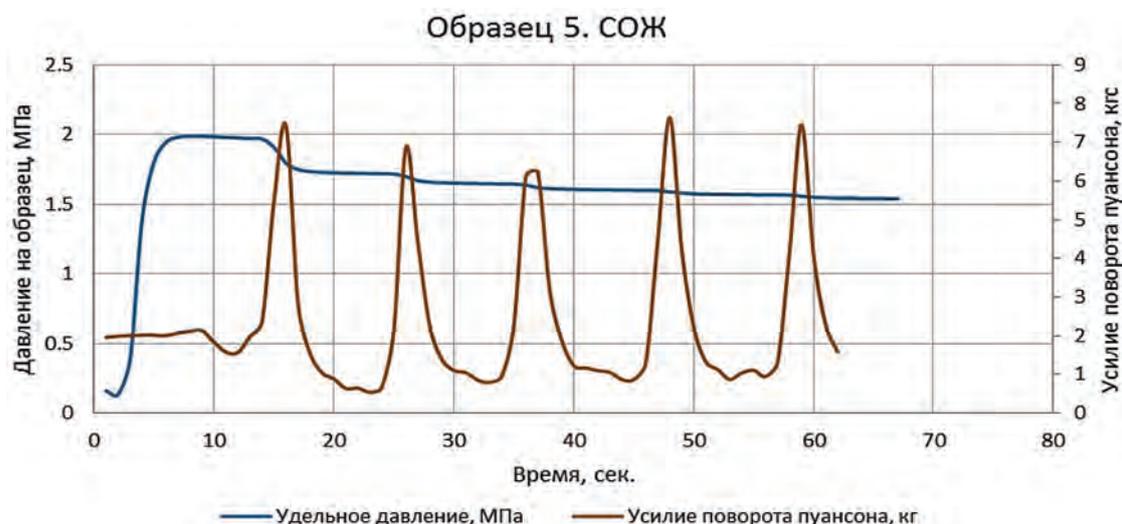


Рис. 8. График изменения удельного давления на поверхность образца и усилия во время поворота пуансона (Образец № 5. Смазка СОЖ)

Разработано автором.

Анализ характера взаимного влияния нормального удельного давления и усилия поворота пуансона, характеризующего процесс сдвига поверхностей металла по инструменту при наличии конкретной смазки, позволяет сделать выводы:

- чем более эффективна смазка, тем большая разница между нормальным и сдвиговым усилием, до 2 раз;
- чем более эффективна смазка, тем больше снижение нормального давления (30 %), при равных значениях усилия сдвига.

Для проведения анализа оптимальным будет выборка 3 максимальных значений из массива данных, полученного во время каждого эксперимента. Результаты занесены в табл. 1.

Среднее значение, показанное в табл. 1, рассчитано путем выбора доверительного интервала методом Корнфельда (среднее арифметическое между минимальным и максимальным измеренным значением).

Из значений табл. 1 можно предположить, что при относительно равных деформационных усилиях оптимальные процессы трения протекают при использовании смазки Mobil Prosol 67. Но окончательные выводы можно сделать только после проведения анализа макроструктуры поверхности и измерения шероховатости поверхности образцов.

Измерения шероховатости Ra (прибор для измерения – профилометр Hommel Tester T500. Jenoptik Germany, зав. номер 82904, гос. поверка от 02.11.15 г.) производились по три раза в разных диаметральных направлениях (смещение оси каждого из измерений на 120 градусов) для каждого из образцов с расчётом среднеарифметического значения (табл. 2). В связи с малой площадью образца ход щупа планиметра установлен 1,5 мм.

Исходя из данных, полученных во время исследования шероховатости образцов, можно с

Таблица 1

Выборка данных, полученных во время эксперимента

Смазка	1		2		3		Среднее значение	
	Усилие поворота, кг	Давление на образец, МПа	Усилие поворота, кг	Давление на образец, МПа	Усилие поворота, кг	Давление на образец, МПа	Усилие поворота, кг	Давление на образец, МПа
Mobil Prosol 67	6,113	1,4	6,049	1,2	5,857	1	5,985	1,2
Fuchs – Renoform KM	8,395	1,7	7,85	1,6	7,6	1,55	7,9975	1,616667
Q8 Oils – Cylroll CR65	7,22	1,53	7,185	1,5	7,169	1,48	7,1945	1,503333
Bechem – Karizol 4130	7,901	1,6	7,637	1,56	7,407	1,49	7,654	1,55
СОЖ	7,633	1,62	7,451	1,57	7,421	1,52	7,527	1,57

Разработано автором.

Результаты измерения шероховатости

Наименование смазки	Шероховатость Ra, мкм			Среднеарифметическое значение Ra, мкм
	1-е измерение	2-е измерение	3-е измерение	
Mobil Prosol 67	0,25	0,22	0,27	0,25
Fuchs - Renoform KM	0,76	0,69	0,82	0,76
Q8 Oils - Cylroll CR65	0,42	0,31	0,38	0,37
Bechem - Karizol 4130	0,63	0,55	0,58	0,59
СОЖ	0,43	0,47	0,46	0,45

Разработано автором.

определенностью сказать, что наилучшее качество поверхности получено при использовании смазки Mobil Prosol 67, а наихудшее при использовании Fuchs - Renoform KM.

Целью проведения исследования образцов с использованием оптического микроскопа является определение состояния макроструктуры поверхности (рис. 9-12).

Поверхность всех образцов содержит дефекты различных размеров; важно отметить, что состояние поверхности на рис. 9 и 11 (смазки Mobil Prosol 67 и Q8Oils Cylroll CR65) отличается от со-

стояния на рис. 10 и 12 (смазки Fuchs Renoform KM и Bechem Karizol 4130).

Состояние поверхности образцов, деформированных со смазками Mobil Prosol 67 и Q8Oils Cylroll CR65, характеризуются круговыми царапинами и «микрораковинами». При этом основная площадь деформации не имеет трещин и следов неравномерности распределения деформационных сил по поверхности контакта. Важным элементом образцов на рис. 9 и 11 является наличие четкой картины и траекторий при кручении образца.

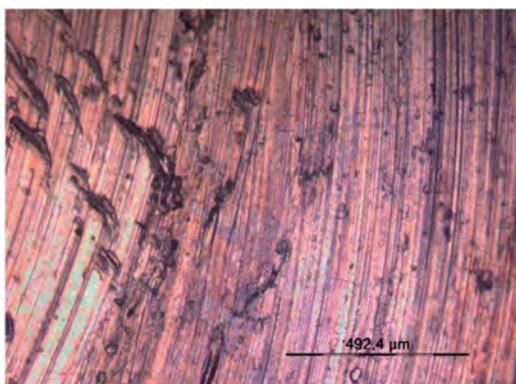


Рис. 9. Структура поверхности (увеличение 20X) медного образца, деформированного в наковальнях Бриджмена с использованием технологической смазки Mobil Prosol 67

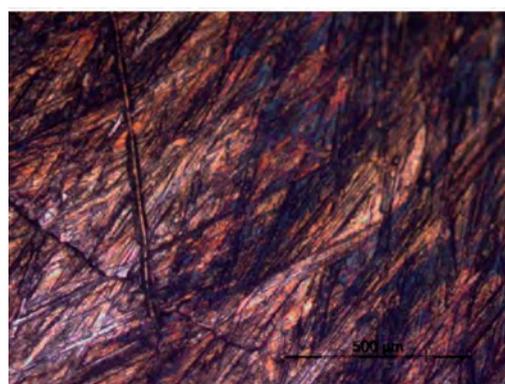


Рис. 10. Структура поверхности (увеличение 20X) медного образца, деформированного в наковальнях Бриджмена с использованием технологической смазки Fuchs - Renoform KM

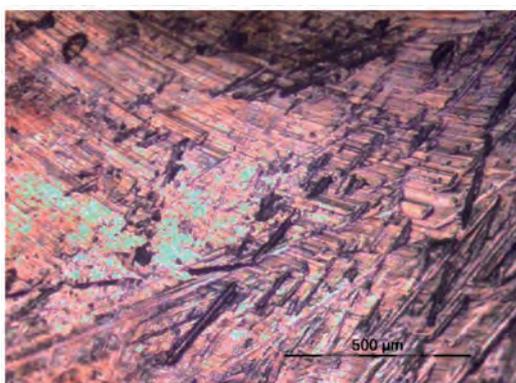


Рис. 11. Структура поверхности (увеличение 20X) медного образца, деформированного в наковальнях Бриджмена с использованием технологической смазки Q8Oils Cylroll CR65

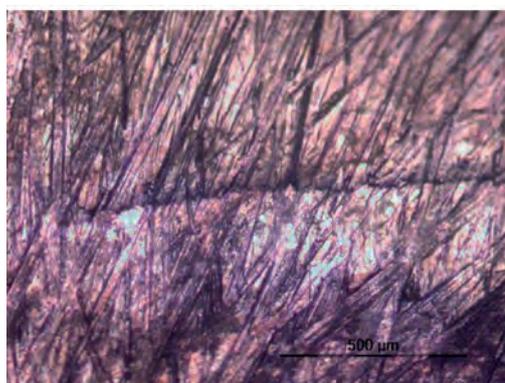


Рис. 12. Структура поверхности (увеличение 20X) медного образца, деформированного в наковальнях Бриджмена с использованием технологической смазки Bechem Karizol 4130

Разработано автором.

В образцах на рис. 10 и 12, напротив, присутствуют микротрещины (на рис. 10 трещина расположена в нижнем левом углу; на рис. 12 трещина расположена по центру, параллельно горизонтальной оси). Такие трещины могут быть свидетельством неравномерного распределения контакта между инструментом и образцом при данной смазке во время вращения пуансона вследствие разных скоростей скольжения металла по инструменту. Глубокие царапины приводят к ускоренному образованию окислений на поверхности образцов. Для более детального анализа образцов, деформированных со смазками Fuchs Renoform KM (рис. 13) и Bechem Karizol 4130 (рис. 14), поверхность образцов была протравлена раствором перекиси водорода 3 % и лимонной кислоты. Обработка низкоактивным

травильным раствором позволила удалить большую часть образовавшихся окислений, не повредив макроструктуру поверхности.

Рис. 13 подтверждает, что микрорельеф поверхности характеризуется разнонаправленными полосами, которые свидетельствуют о растягивающих воздействиях, вызванных неравномерным контактом инструмента с образцом, что и приводит к высокой скорости окисления поверхности. Такие выводы подтверждаются повышенной шероховатостью образца (среднее значение Ra = 0,76 мкм).

Поверхность образца на рис. 14 характеризуется большим количеством участков, поврежденных окислениями. После травления на образце прослеживается направление и траектория вращения пуансона.

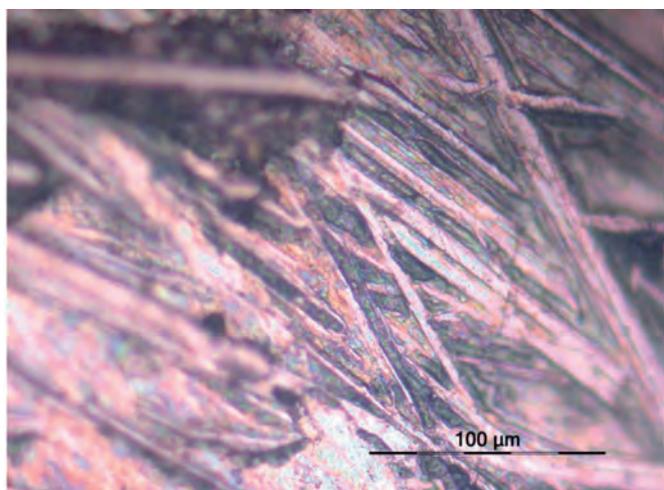


Рис. 13. Поверхность образца, деформированного с нанесением смазки Fuchs – Renoform KM, после травления (увеличение 100X)

Разработано автором.

#### Выводы

1. Разработана методика оценки эффективности технологических смазок для холодной периодической прокатки с применением наковален Бриджмена.

2. Результаты экспериментальных исследований с разделением силового воздействия на металл на нормальное давление и усилие поворота позволили установить значение влияния относительного скольжения металла на качество поверхности.

3. Лучшей смазкой из исследованных, обеспечивающей минимальное усилие деформации и минимальную шероховатость (наилучшее качество) поверхности, является Mobil Prosol 67.

4. Предложенный метод оценки эффективности технологических смазок практически не требует затрат на материалы для исследований (смазка, металл).

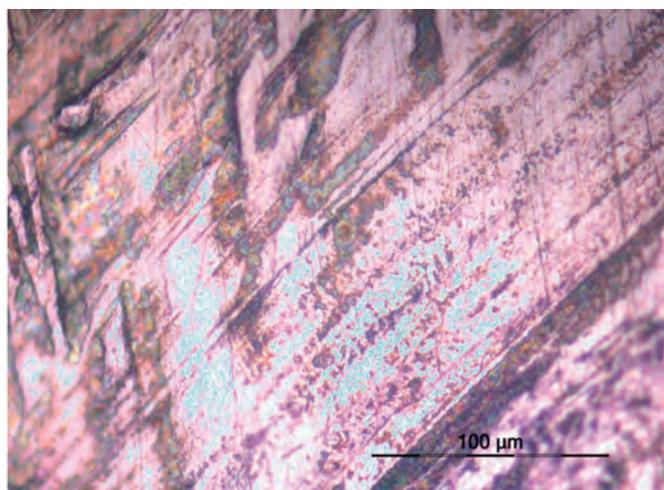


Рис. 14. Поверхность образца, деформированного с нанесением смазки Bechem Karizol 4130, после травления (увеличение 100X)

Разработано автором.

#### Библиографический список / References

1. Райков Ю. Н. Мировая медная промышленность / Ю. Н. Райков, Г. Н. Кручер. – М.: ОАО «Институт Цветметобработка», 2012. – 256 с.

Raykov Yu. N., Krucher G. N. *Mirovaya mednaya promyshlennost'*. Moscow, Institut Tsvetmetobrabotka, 2012, 256 p.

2. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М.: Metallurgiya, 1982. – 312 с.

Grudev A. P., Zil'berg Yu. V., Tilik V. T. *Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem*. Moscow, Metallurgiya, 1982, 312 p.

3. Тетерин П. К. Теория периодической прокатки / П. К. Тетерин. – М.: Metallurgizdat, 1978. – 254 с.

Teterin P. K. *Teoriya periodicheskoy prokatki*. Moscow, Metallurgizdat, 1978, 254 p.

4. Фролов В. Ф. Холодная пильгерная прокатка труб: монография / В. Ф. Фролов, В. Н. Данченко, Я. В. Фролов. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – 255 с.

Frolov V. F., Danchenko V. N., Frolov Ya. V. *Kholodnaya pil'gernaya prokatka trub*. Dnepropetrovsk, Porogi, 2005, 255 p.

5. ГОСТ 617-90 «Трубы медные». Межгосударственный стандарт. Технические условия.

GOST 617-90 "Truby mednye". Mezghosudarstvennyy standart. Tekhnicheskie usloviya.

6. Европейский стандарт EN1057:2006+A1:2010. Медь и медные сплавы. Трубы круглые медные бесшовные для воды и газа санитарно-технического назначения и отопительные.

Evropeyskiy standart EN1057:2006+A1:2010. Med' i mednye splavy. Truby kruglye mednye besshovnye dlya vody i gaza sanitarno-tekhnicheskogo naznacheniya i otopitel'nye.

7. Европейский стандарт EN12451. Медь и медные сплавы. Бесшовные круглые трубы для теплообменных аппаратов.

Evropeyskiy standart EN12451. Med' i mednye splavy. Besshovnye kruglye truby dlya teploobmennykh apparatov.

8. ГОСТ 21646-2003 – Трубы медные и латунные для теплообменных аппаратов. Технические условия (действует на территории Украины).

GOST 21646-2003 – Truby mednye i latunnye dlya teploobmennykh apparatov. Tekhnicheskie usloviya (deystvuet na territorii Ukrainy).

9. Попов М. В. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / М. В. Попов, С. В. Атанасов, Ю. М. Беликов. – Днепропетровск: ООО «Независимая издательская организация «Дива», 2008. – 192 с.

Popov M. V., Atanasov S. V., Belikov Yu. M. *Sovershenstvovanie protsessa periodicheskoy prokatki trub*. Dnepropetrovsk, Diva, 2008, 192 p.

10. Зильберг Ю. В. Теория обработки металлов давлением: монография / Ю. В. Зильберг. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 234 с.

Zil'berg Yu. V. *Teoriya obrabotki metallov davleniem*. Dnepropetrovsk, Porogi, 2009, 234 p.

**Purpose.** Selection of lubricants for use in the process of production of copper tubes by cold rolling on mills such as HPT – a very important aspect of planning the production technology because the lubricant used has a huge impact on both energy-power parameters of rolling and in the quality of the final product. Testing of lubricants by directly applying them in a cold rolling periodic economically inexpedient

**Methodology.** The described test procedure allows you to check lubricant grease on the applicability to the conditions of cold rolling of copper pipes in the laboratory with parameters similar to those that occur in the deformation zone during rolling on the mill HPT. It is important that the economic costs in testing lubricants developed technique are minimal.

**Findings.** The results of the study of lubricants produced in the process of deformation of samples of copper (M1 alloy) in the Bridgman anvils. Conditions for and the numerical values of the parameters are close to those that take place in the deformation zone during rolling of copper pipes in mills HPT.

**Originality.** The possibility of testing lubricants by testing lubricants Bridgman anvils.

**Practical value.** Development of the theory research methodology applicability of lubricants to the conditions of the periodic cold rolling tube of copper and copper alloys.

**Key words:** periodic cold rolling, lubrication technology, copper pipes, deformation technique tests.

**Рекомендована к публикации  
д. т. н. Ю. Г. Гуляевым**

**Поступила 21.10.2016**

