

атации и ремонта является конструкция составного вала с твердосплавными бандажами, в которой использована скользящая посадка бандажа на вал с последующей фиксацией специальным зажимным устройством, создающим сжимающие напряжения вдоль оси вала.

Использование технологии ГВП с циклической обработкой сплавов на основе карбида вольфрама с кобальт-никелевой связкой позволяет получить бандажи для прокатных валков для производства периодических профилей со служебными характеристиками на уровне лучших мировых аналогов.

Экономический эффект от снижения удельного расхода валков при использовании валков составной конструкции относительно невелик. Основной эффект достигается за счет роста производительности прокатного стана, в результате возрастания количества проката на калибр за 1 установку в 9–11 раз, что обеспечивает увеличение производительности на 8–9 %.

Библиографический список

1. Труханов С.В., Сидоренко Д.Г., Пашинский В.В. Прокатные валки дискового типа для чистовых прокатных блоков проволочных станов. Особенности технологии производства // *Металл и литье Украины*. – 2001. – № 7–9. – С. 64–66.

2. Производство твердосплавных прокатных валков дискового типа и факторы, влияющие на их эксплуатационную стойкость / А.Г. Маншилин, Д.П. Кукуй, Д.Г. Сидоренко и др. // *Металл и литье Украины*.

– 2004. – № 3–4. – С. 17–18.

3. Производство изделий из твердых сплавов / В.В. Пашинский, Д.Г. Сидоренко, В.В. Каширин и др. // *Металл и литье Украины*. – 2006. – № 7–8. – С. 60–64.

4. Расширение сортамента и повышение эффективности использования твердосплавных прокатных валков / А.Г. Маншилин, В.В. Пашинский, Д.Г. Сидоренко и др. // *Тр. VII конгресса прокатчиков*. – Т. 1. – М.: АО «Черметинформация». – 2007. – С. 406–411.

5. Теория, технология и практика производства твердосплавных прокатных валков / А.И. Лисовский, В.В. Пашинский, А.Г. Маншилин др. // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2010. – № 1(19). – С. 4 0.

6. Разработка научных основ технологии производства крупногабаритных твердосплавных изделий и освоения их промышленного производства для металлургической промышленности Украины / А.Ф. Лисовский, В.В. Пашинский, Э.О. Цкитишвили и др. // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 1–2. – С. 4–55.

7. Технологія виробництва крупногабаритних твердосплавних виробів та освоєння їх виробництва для металургійної промисловості України / А.Ф. Лисовський, В.В. Пашинський, Е.О. Цкитішвілі та ін. // *Сверхтвердые материалы*. – 2010. – № 2. – С. 30–42.

Поступила 05.02.2013

УДК 621. 771. 23. 003. 1

Николаев В.А. /д.т.н./

Запорожский НТУ

Наука

Влияние технологической смазки на параметры прокатки полос

Выполнен теоретический анализ влияния эффективной технологической смазки на условия захвата металла валками. Представлены экспериментальные исследования параметров прокатки с положительным и отрицательным значением опережения полосы при различных обжатиях. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: прокатка, смазка, опережение, контактные напряжения, ПАВ

The theoretical analysis of the impact of an effective technological grease to capture conditions of metal rollers is performed. The experimental studies of parameters of rolling with the positive and negative values of lead the band forward creep at different compression are shown.

Keywords: rolling, lubrication, proactive, contact stresses, surfactants

Введение

Для снижения влияния контактных сил трения (контактных касательных напряжений) на процесс прокатки применяют различные типы смазок: эмульсии минеральных масел (СОЖ), чистые минеральные и растительные масла, загущенные смазки. Их физико-химические характеристики различны и в зависимости от этого, как показывают исследования [1–5, 7, 8] тип смазки оказывает различное воздействие на условия трения, опережение и контактные напряже-

ния. Так, при прокатке с малоэффективными смазками (СОЖ, легкие минеральные масла) на контакте полоса-валок образуются технологические слои смазки и имеет место граничное (полужидкостное трение), при котором в очаге деформации существуют зоны отставания и опережения и действительны зависимости Головина-Дрездена и Эжелунда–Павлова [1]. При таких условиях трения во всех случаях опережение больше нуля ($S > 0$). В условиях жидкостного трения в очаге деформации возможны случаи, когда опережение боль-

ше или меньше нуля. Возможность появления отрицательного «опережения» при отсутствии пробуксовки валков по полосе показана в работах [1, 9].

Основная часть исследований

Схема очага деформации при прокатке с высоковязкой смазкой (жидкостное трение) при наличии отрицательного опережения представлена на рис. 1. Нам представляется следующий механизм взаимодействия в системе валок - слой смазки - полоса. В этой системе полоса не взаимодействует непосредственно с валками, т.к. она отделена от поверхности валков слоем смазки. Поэтому слой смазки оказывает самостоятельное и непосредственное воздействие и на полосу и на валок. При входе в валки определенное количество смазки захватывается валками, имеющими большую скорость, чем полоса ($v_B > v_H$) и некоторое количество смазки выходит из очага деформации вместе с валками и полосой. Очевидно, что объем смазки, выходящей из валков, будет меньше, чем объем смазки, нагнетаемой валками в очаг деформации, поскольку меньше толщина слоя смазки [2, 4], а скорость валков постоянная, т.е. $Q_H > Q_h$ (Q_H и Q_h – объем смазки, входящей в валки и выходящей из валков). Излишек технологической смазки из очага деформации принудительно выдавливается валками против движения полосы. При этом валки воздействуют на полосу напряжением τ_B , а смазка воздействует на полосу с напряжением τ_{II} . Поскольку валок имеет большую скорость чем полоса, то он действует на слой смазки с напряжением τ_B на контакте, направленными по ходу движения полосы, а слой смазки выходящей из очага деформации создает на контакте противоположные (внутренние) напряжения. Валки через слой смазки создают на контактной площадке нормальное напряжение «р». Условие равновесия сил (напряжений), действующих в горизонтальной плоскости запишем в виде ($B = 1, h_y = h_{cp}$)

$$-p \cdot \sin \varphi + \tau_{II} \cdot \cos \varphi + \tau_e \cdot \cos \varphi - \sigma_3 + \sigma_{II} = 0, \quad (1)$$

где p – нормальная составляющая средних нормальных контактных напряжений; τ_{II} – контактное касательное напряжение на контакте полоса- слой смазки; τ_B – контактное касательное напряжение между поверхностью валка и слоем смазки; σ_3 и σ_{II} – напряжение натяжения соответственно заднее и переднее.

Принимая условия трения Амонтона и выполнив преобразования, получим

$$\operatorname{tg} \varphi = f \left(1 + \frac{\tau_{II}}{\tau_B} \right) - \frac{\sigma_3 - \sigma_{II}}{P} = 0. \quad (2)$$

Если принять $\varphi = \alpha/2$, что допустимо в рассматриваемых условиях, и $\operatorname{tg} \alpha/2 \approx \alpha/2$ (при небольших углах) получим

$$\alpha = 2f \left(1 + \frac{\tau_{II}}{\tau_B} \right) - \frac{\sigma_3 - \sigma_{II}}{P} = 0 \quad (3)$$

В частном случае, когда $\sigma_3 = \sigma_{II}$ получим

$$\alpha = 2f \left(1 + \frac{\tau_{II}}{\tau_B} \right) = 0$$

Из выражения (4) следует, что при наличии высоко-

ковязкой смазки, слой которой полностью разделяет шероховатости валков и полосы, устойчивый процесс прокатки, без буксования, может быть осуществлен при $\alpha > 2f$. Возможности эти возрастают при увеличении параметра τ_{II}/τ_B . Без специальных исследований пока не возможно установить величину τ_{II} , но в подобных условиях деформации отношение всегда $\tau_{II}/\tau_B > 0$. Это не может вызывать сомнения, т.к. слой смазки способствует продвижению полосы вдоль очага деформации и, имея напряжение течения меньше, чем сама полоса, смазка получает большую вытяжку, обеспечивая при этом деформацию и перемещение полосы. Подтверждением этому служат ранее проведенные эксперименты по прокатке пакетов из трех полос: наружные из алюминия, а внутренняя – из стали 08кп после упрочнения (валки стальные, сталь 9Х, толщина алюминиевых полос $H = 1,2$ мм, а стальной $H_{ст} = 0,25$ мм [6, 9]. В результате опытов установили, что одновременно с обжатием алюминиевых полос в пределах $\varepsilon = 0,25-0,42$ стальные полосы деформировались на $\varepsilon_{ст} = 0,06-0,147$. При этом между обжатием мягких (алюминиевых) полос и жестких (стальных) полос существует прямопропорциональная зависимость $\varepsilon_{см} = 0,6(\varepsilon - 0,17)$, которая не зависит от шероховатости валков. Таким образом, прочная стальная полоса, находящаяся между сравнительно мягкими пластинами при их деформации в валках получает собственную деформацию за счет появления в её поперечных сечениях продольных растягивающих напряжений, вследствие больших величин вытяжек наружных мягких слоев.

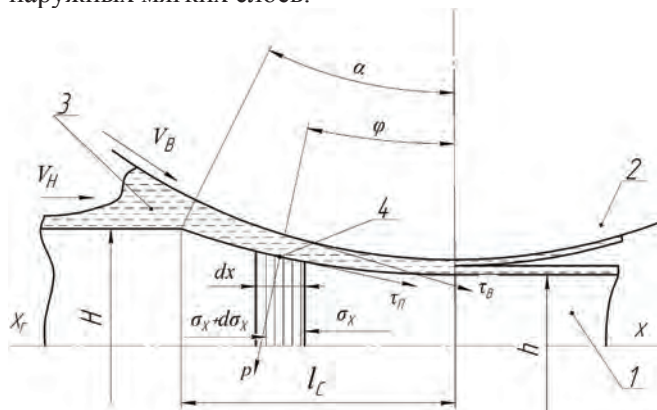


Рис. 1. Схема действия внешних и внутренних напряжений при прокатке полосы с высоковязкой смазкой: 1 - полоса; 2 - валок; 3 - слой смазки; 4 - контактная площадка

$$\varepsilon_{см} = 0,6(\varepsilon - 0,17),$$

которая не зависит от шероховатости валков. Таким образом, прочная стальная полоса, находящаяся между сравнительно мягкими пластинами при их деформации в валках получает собственную деформацию за счет появления в её поперечных сечениях продольных растягивающих напряжений, вследствие больших величин вытяжек наружных мягких слоев.

Рассматривая особенности прокатки полос с высоковязкими смазками вспомним также эффект П.А. Ребиндера [10]. В соответствии с утверждениями П.А. Ребиндера при взаимодействии высокоэффе-

тивных смазок с металлом их поверхностно-активные молекулы способны проникать не только в зачаточные микротрещины, имеющиеся на поверхности всех реальных тел, но и оказывать механическое действие, облегчающее пластическую деформацию тела (металла). Оценить степень влияния указанных эффектов можно экспериментальными исследованиями.

О наличии отрицательного опережения при прокатке полос без пробуксовок с твердыми и высоковязкими смазками отмечается в работе [11]. В качестве основной причины такого процесса прокатки авторы [11] считают возникновение в очаге деформации растягивающих внутренних напряжений в сечениях полосы за счет обратного выдавливания (против движения полосы) технологической смазки. В ряде случаев эти растягивающие напряжения приводят к разрыву полосы внутри очага деформации.

Ниже приведены частичные результаты экспериментальных исследований технологических смазок, а их некоторые параметры физико-химических характеристик даны в таблице [3, 5].

Таблица. Характеристика технологических смазок*

№ смазки	Тип смазки	Вязкость, мм ² /с, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Кислотное число, мГКОН/г	№ смазки	Тип смазки	Вязкость, мм ² /с, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Кислотное число, мГКОН/г
1	ХР	65	0,1	9	ПКС	110	11,0
2	ХРО	90	0,76	10	ПО	1320	3,93
3	-"	269	1,63	11	КЖО	1804	13,13
4	-"	532	2,93	12	И-20А	20	0,05
5	-"	1260	3,02	13	ОХМ	630	40,0
6	-"	1586	3,91	14	КО СЖК	>5000	95,0
7	-"	1784	3,34				
8	-"	2100	4,13				

*Смазки: 1-ХР – хлопковое рафинированное; 2-8-ХРО – хлопковое рафинированное окисленное; 9 – ПКС (подсолнечное гидрогенизированное); 10 – ПО подсолнечное окисленное; 11 – КЖО (коряндоровое жирное окисленное); 12 – И-20А (индустриальное); 13 – ОХП (ПХМ) – отработанное хлопковое масло из ванн горячего лужения (полимеризованное); 14 – КО СЖК – кубовые остатки синтетических жирных кислот (Вязкость смазок №№ 12-14 определена при температуре 50 °С)

Экспериментальные исследования выполняли на стане с диаметром валков 260 мм из стали марки 9Х с твердостью поверхности ~90 НSD и шероховатостью поверхности 0,6-0,9 мкм R_a . Прокатывали полосы толщиной $H \approx 0,5-2,2$ мм и шириной $B \approx 60$ мм при скорости валков ~0,3 м/с с обжатием ~10-70 %.

На рис. 2 представлены зависимости изменения опережения, коэффициента трения и среднего нормального контактного напряжения при прокатке полос с растительными смазками, имеющими различную вязкость (η) (смазки №№ 1-11). Устойчивый процесс прокатки происходит во всем диапазоне изменения вязкости смазки, а следовательно, и толщины её слоя в очаге деформации [4], т.е. при наличии зон отставания и опережения. При этом опережение уменьшается с $S \approx 5,4$ до 3,4 % сохраняя достаточный запас сил контактного трения для осуществления

устойчивого процесса и при дальнейшем увеличении вязкости ($\eta > 2100$ мм²/с). Коэффициент трения уменьшается с $f \approx 0,042$ до $f \approx 0,025$, достигая значений, характеризующих условия жидкостного трения [4]. При прокатке полос с $H = 0,8$ мм после отжига и дрессировки (первый проход) величины коэффициента

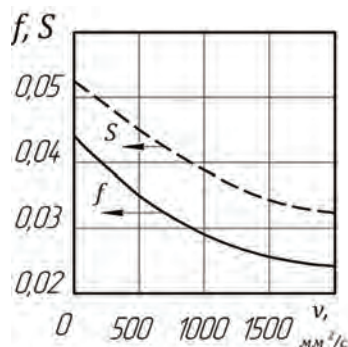


Рис. 2. Влияние вязкости смазки на опережение S и коэффициент трения f (D = 256 мм, H = 0,52 мм, $\epsilon = 0,3$, полосы из стали 08кп с исходными размерами 0,8x60 мм, шероховатостью валков 0,6-0,8 мкм R_a (второй проход))

трения, определенного по опережению, оказывались значительно выше [5]. Максимальные его значения для смазки № 1 составляли $f \approx 0,046$, а минимальные для смазки № 8 $f \approx 0,035$. То есть, шероховатость полосы оказывает небольшое влияние при прокатке со смазкой небольшой вязкости (№ 1) и существенное при большой вязкости (№ 8).

При прокатке с применением масла марки И-20А опережение больше нуля и возрастает с 2 до 6,13 % с увеличением обжатия ϵ (рис. 3а). В этих условиях прокатки с увеличением обжатия коэффициент трения снижается с 0,056 до 0,051 (рис. 3б), СНКН возрастает с 515 до 800 Н/мм² и значительно превышает определенное на полосах среднее сопротивление металла деформации (σ_{ϕ}) (рис. 3в, кривые 1, 4).

Как видно на рис. 3, при прокатке полос с $H = 0,8$ мм, $B = 60-62$ мм, $R_{an} = 1,5$ мкм, тип технологической смазки оказывает существенное влияние на опережение, коэффициент трения и среднее нормальное контактное напряжение (СНКН) p_{cp} в очаге деформации. Использование высоковязких смазок типа ОХМ и КО СЖК позволяет прокатывать полосы с положительными значениями опережений. Однако, нормальный процесс прокатки при $S > 0$ с применением масла типа ОХМ наблюдается при $\epsilon < 45\%$, а в случае применения смазки типа КО СЖК - при $\epsilon < 15\%$. Прокатка с большими обжатиями происходит в аномальных условиях с отрицательными опережениями (рис. 3а, кривые 2, 3), когда скорость полосы на выходе меньше окружной скорости валков. Наиболее существенное снижение скорости полосы имеет место при использовании смазки типа КО СЖК в области $\epsilon < 55-65\%$ (рис. 3а, кривая 3). В этих условиях отрицательное опережение достигает величины $S \approx -16\%$. При $\epsilon > 65\%$ происходит уменьшение абсолютных значений отрицательного опережения.

Появление отрицательного опережения при про-

катке с высоковязкими смазками обусловлено действием напряжений во входном сечении очага деформации, направление действия которых противоположно движению полосы. Напряжения возникают вследствие выдавливания смазки из очага деформации в направлении наименьшего сопротивления ее течению (т.е. против движения полосы) и благодаря высокой адгезии смазки КО СЖК к поверхности полосы при наличии высоких значений кислотного числа.

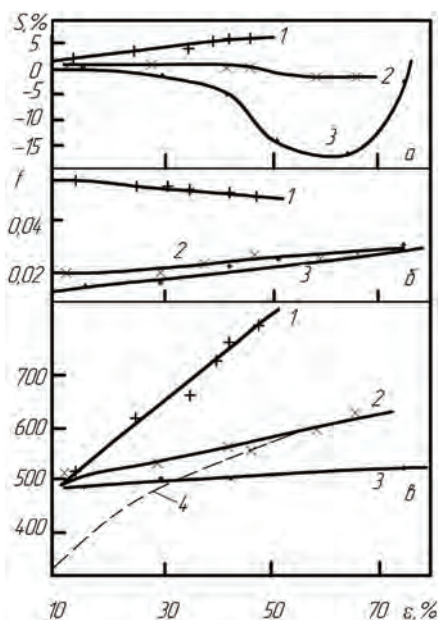


Рис. 3. Зависимость от обжатия параметров прокатки и среднего сопротивления металла деформации при прокатке со смазками И-20 (1), ОХМ (2), КО СЖК (3) полос из стали 08кп после отжига и дрессировки $H \approx 0,8$ мм, $B = 60-62$ мм

Повышение отрицательного опережения (при $\epsilon \approx 30-60\%$) (рис. 3а, кривая 3) обусловлено увеличением распирающего действия смазки и появлением мгновенных пробуксовок валков по полосе, о чем свидетельствует осциллограмма изменения усилия прокатки (рис. 4). Задачу полосы в прижатые друг к другу валки с целью обеспечения захвата производили на ползучей скорости (участок АБ на рис. 4). При переходе к скорости валков $v = 0,275$ м/с сила прокатки снижается (см. участок БВ на рис. 4) примерно на 14 % и процесс прокатки происходит с периодическими изменениями силы (участок ВГ на рис. 4), что свидетельствует о наличии мгновенных пробуксовок. На участке АБ рис. 4 сила P_1 не имеет периодических колебаний, и процесс прокатки проходит устойчиво.

Уменьшение отрицательного опережения при $\epsilon > 65\%$, очевидно, связано с уменьшением толщины слоя смазки в очаге деформации [5] повышением ее вязкости за счет увеличения силы в очаге деформации (рис. 3в, кривая 3) при одновременном увеличении коэффициента трения (рис. 3б, кривая 3). В этих условиях прокатки сопротивление течению смазки металла в направлении к плоскости входа в валки возрастает, что способствует увеличению объема смазки, выдавливаемого в направлении движения полосы.

Как видно на рис. 3б (кривая 1), при прокатке полос с использованием масла марки И-20А (№ 12) коэффициент трения изменяется в пределах 0,056-

0,051, снижаясь с увеличением обжатия несмотря на уменьшение толщины слоя смазки. При прокатке с высоковязкими смазками [ОХМ (№ 13, КО СЖК (№ 14)] коэффициент трения с увеличением обжатия возрастает с 0,016-0,020 до 0,030 (рис. 3б, кривые 2, 3). Значения коэффициента трения при использовании смазки типа ОХМ (№ 13) несколько больше, чем при использовании смазки типа КО СЖК (№ 14). Увеличение обжатия полосы способствует повышению значений коэффициента трения, что связано с уменьшением толщины слоя смазки, повышением доли граничного и снижением доли жидкостного трения [4].

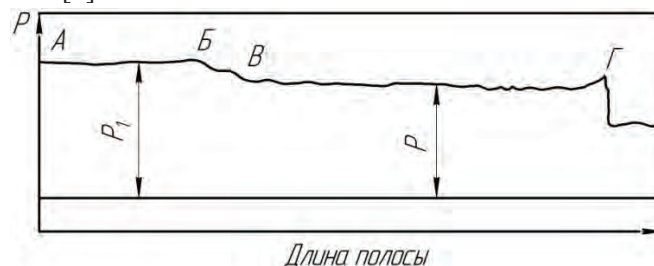


Рис. 4. Осциллограмма силы прокатки полосы из стали 08кп при $H = 0,8$ мм и $\epsilon \approx 69\%$ со смазкой КО СЖК на шлифованных валках

При $\epsilon < 12\%$ значения СНКН для различных смазок близки между собой (рис. 3в). С увеличением обжатия они возрастают; повышается также различие между их величинами для разных смазок. Наибольшие значения среднего давления получены при использовании масла марки И-20А (№ 12), а меньшие - при использовании КО СЖК (№ 14).

При прокатке со смазкой типа КО СЖК (№ 14) увеличение обжатия от 12 до 75 % повышает СНКН с 485 до 530 Н/мм², т.е. всего в 1,09 раза (при использовании масла марки И-20А (№ 12) - в 1,56 раза при увеличении обжатия до 47,5 %. На рис. 3в видно, что прокатка с высоковязкой смазкой КО СЖК обеспечивает процесс прокатки при $\epsilon > 35\%$ со СНКН (кривая 3), значения которого меньше сопротивления деформации металла в очаге деформации.

При прокатке полос со смазкой ОХМ (№ 13) в поперечных сечениях полосы также возникают продольные растягивающие напряжения, но при $\epsilon > 50\%$ величина их незначительна, о чем свидетельствует незначительное отличие опережения от нуля и равенство средних нормальных контактных напряжений величине среднего сопротивления металла деформации ($\sigma_\phi = \lambda \sigma_T$, где λ - коэффициент Лоде; σ_T - среднее значение напряжения металла).

Обратим внимание на случай прокатки полос со смазками ХРО (№ 8) (при $v = 2100$ мм²/с, рис. 2) и ОХМ (№ 13) (при $v = 650$ мм²/с, при $t = 50$ °С). В первом случае коэффициент трения равен $f = 0,025$ (рис. 2), а во втором случае (при $\epsilon = 31\%$, рис. 3) коэффициент трения равен $f = 0,021$ (кривая 2). В первом случае прокатка полосы осуществляется с положительным опережением ($S \approx 3,1\%$), а во втором случае опережение близко к нулевой отметке при отсутствии тенденции к появлению пробуксовок при увеличении обжатия полосы. Наличие опережения в первом экспе-

рименте, очевидно, свидетельствует о переходе жидкостного трения в начале очага деформации в граничное трение и возникновении контактных касательных напряжений, препятствующих течению металла в зоне отстаивания. По этой причине образуется зона опережения (рис. 2). Смазка (ОХМ № 13) отличается от первой (ОХР № 8) наличием (при одной и той же вязкости) большим количеством насыщенных жирных кислот [4, 10, 11], о чем свидетельствует существенно большее кислотное число в смазке ОХМ (табл.), обеспечивающее большее сродство смазки к металлу и более прочную пленку смазки на валке и полосе, т.е. большую активность ПАВ (поверхностно-активных веществ).

Влияние высокой вязкости и содержания ПАВ с кислотным числом 95 мг КОН/г в большей степени проявляется при использовании в качестве смазки КО СЖК (№14) (рис. 3, кривая 3), при наличии которой абсолютное значение отрицательного опережения увеличивается до ~15 % при относительном обжатии $\varepsilon \approx 60\%$, после чего наблюдается резкое уменьшение отрицательного опережения, вплоть до $S \approx 0$ при $\varepsilon \approx 73\%$. Во всем этом диапазоне обжатий процесс прокатки выполняется при отсутствии заметных пробуксовок валков по полосе. Из полученных результатов следует, что при прокатке с высоковязкой технологической смазкой с высоким кислотным числом, а следовательно, с эффективными ПАВ, в соответствии с законом наименьшего сопротивления металл выдавливается из очага деформации в направлении к плоскости входа полосы в валки, а скорость входящего конца полосы будет равна

$$v_H = v_B \cdot \cos \alpha / \mu(1 - S_H),$$

где μ – коэффициент вытяжки полосы; S_H – абсолютное значение отрицательного опережения.

Физическая природа такого процесса заключается в том, что, благодаря существенному влиянию ПАВ и высокого химического сродства смазки к металлу на поверхностях полосы и валков, еще до плоскости входа полосы в валки, образуется прочная пленка смазки. Эти пленки активируют нагнетание смазки в очаг деформации, излишки которой из среднего слоя смазки выдавливаются против хода прокатки (в соответствии с законом наименьшего сопротивления течению материала), создавая в поперечных слоях полосы растягивающие напряжения, вызывающие продольное «попятное» течение металла. При такой деформации возможно, что конечная толщина полосы формируется еще до действительной плоскости выхода её из очага деформации. Выше отмечалась возможность разрыва полосы в очаге деформации в результате уменьшения её толщины [7, 11]. При увеличении обжатия $\varepsilon > 60\%$ (при увеличении абсолютного обжатия и угла захвата) ухудшаются условия захвата смазки, уменьшается толщина её слоя [4], повышается сопротивление «попятному» течению металла и процесс переходит в стадию образования классической зоны опережения. Зона опережения появляется тем раньше, чем меньше эффективность ПАВ (меньше кислотное число, например, рис. 2).

Выводы

Анализ процесса прокатки полос с высоковязкими смазками (и с большим кислотным числом) представляет, главным образом, научный интерес. Однако он имеет и практическое значение, например, для получения тонких полос не в многовалковых клетях, а в клетях кварто, для прокатки сверхтонкой жести.

Эффективность растительных масел (9 смазок) обусловлена не только величиной вязкости, но и характеристикой смазки в виде её кислотного числа. При этом, чем выше кислотное число, тем выше эффективность смазки в снижении трения, опережения и среднего нормального контактного напряжения. При прокатке со смазкой КО СЖК (№ 14) и обжатиях $\varepsilon > 30\%$ средние нормальные контактные напряжения на 5-10 % меньше чем величина сопротивления металла деформации.

На основании анализа напряжений в очаге деформации показано, что устойчивый процесс прокатки возможен при $\alpha > 2f$ с отрицательным опережением, величина которого обусловлена типом технологической смазки.

Библиографический список

1. Николаев В.А. Теория прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 228 с.
2. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазка при обработке металлов давлением. - М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
3. Николаев В.А. Технологические параметры прокатки с высоковязкими смазками. Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. - № 4. - С. 32-34.
4. Грудев А.П., Тилик В.Т. Технологические смазки в прокатном производстве. - М. Металлургия, 1975. – 368 с.
5. Николаев В.А., Доля В.С., Шкурупий Е.Н. Смазочные свойства жирных масел и связь с жирнокислотным составом // Обработка металлов давлением (ДМетИ, сб. 59). - М.: Металлургия, 1976. - С. 205-209.
6. Николаев В.А., Скороходов В.Н., Полухин В.П. Несимметричная тонколистовая прокатка. - М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
7. Белосевич В.К. Трение, смазка и теплообмен при холодной прокатке листовой стали. М.: Металлургия, 1989. – 256 с.
8. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Теория прокатки. Гидродинамические эффекты смазки. М.: Металлургия, 1989. – 192 с.
9. Николаев В.А., Мазур В.Л., Голубченко А.К., Бинкевич Е.В. Теория и технология не симметричной прокатки. - К.-М.: Инфомарт, 1996. – 262 с.
10. Дерягин Б.В. Что такое трение? - М.: АН СССР, 1963. – 230 с.
11. Чертавских А.К., Белосевич В.К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением. - М.: Металлургия, 1968. – 364 с.

Поступила 05.01.2013