

УДК 621.771

УСЛОВИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ВАЛКОВ И ЗАГОТОВКИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ ПОЛОСЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ПЯТИКЛЕТЕВОМ СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ 2800

© 2025 В.В. Яшин³, И.А. Латушкин³, Е.В. Арышенский², Е.А. Суздальцев¹,
М.А. Лапшов³, С.В. Коновалов²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, г. Самара, Россия

² Сибирский государственный индустриальный университет г. Новокузнецк, Россия

³ Самарский металлургический завод, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 27.05.2025

В работе была разработана методика расчета толщины смазочной пленки в очаге деформации при горячей прокатке полос из алюминиевых сплавов на пятиклетевом стане 2800. Исследованы условия контактного взаимодействия рабочих валков и заготовки с учетом режимов трения (сухого, граничного и жидкостного). Установлено, что при использовании водомасляной эмульсии с содержанием масляной фазы 3–6% в первых трёх клетях преобладает граничное трение, а в четвертой и пятой — смешанное.

Ключевые слова: горячая прокатка, алюминиевые сплавы, трение, смазочная пленка, пятиклетевой стан.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-142-146

EDN: RBSYCL

ВВЕДЕНИЕ

Процесс непрерывной прокатки полос из алюминиевых сплавов является важнейшим этапом производства изделий различного назначения, широко применяемых в авиационной промышленности, автомобилестроении, строительстве и многих других отраслях экономики. Особое внимание уделяется условиям трения, поскольку именно от них зависят качество поверхности проката, точность геометрических размеров и эксплуатационные характеристики конечного продукта [1].

Так как горячая прокатка алюминиевых сплавов осуществляется с применением СОЖ, то при прокатке возможны три вида трения: сухое, граничное и жидкостное [2]. Сухое трение наблюдается, когда поверхности трущихся тел совершенно свободны от смазки. При наличии на контактных поверхностях тончайших пленок смазки (толщиной порядка сотых микрона) трение называют граничным [3]. Жидкостное или гидродинамическое трение устанавливается при большой толщине разделительного смазочного слоя, когда неровности поверхностей контактируемых тел не входят в непосредственное зацепление. Условия горячей прокатки алюминиевых сплавов в непрерывных клетях чистовой группы соответствуют граничному трению или смешанному (полужидкостному), в зависимости от параметров прокатки. Смешанное (полужидкостное) трение характеризуется недостаточной толщиной смазочного слоя для полного разделения вала и полосы, в результате чего при сдвиге происходит зацепление поверхностей в отдельных точках, т.е. существуют очаги граничного или сухого трения [2].

При горячем деформировании металла на пятиклетевом стане горячей прокатки 2800 возникают специфические условия деформации, характеризующиеся высокими температурами, большими давлениями и скоростями перемещения материала. Эти факторы оказывают значительное влияние на трение между валком и заготовкой, износ оборудования, формирование дефектов поверхности и геометрии изделия [4]. Изучение закономерностей процесса контактного взаимодействия позволит оптимизировать режимы обработки, повысить производительность и снизить энергозатраты, обеспечивая выпуск продукции высокого качества. Исходя из этого целью, данной работ, является

Яшин Василий Владимирович, кандидат технических наук, менеджер по печному оборудованию.

E-mail: Vasily.Yashin@samara-metallurg.ru

Латушкин Илья Анатольевич, специалист по технологической наладке. E-mail: Ilya.Latushkin@samara-metallurg.ru

Арышенский Евгений Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК. E-mail: arishenskiy_ev@sibsiu.ru

Суздальцев Егор Алексеевич, студент.

Лапшов Максим Александрович, инженер-конструктор. E-mail: Maksim.Lapshov@samara-metallurg.ru

Коновалов Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и машиностроения. E-mail: kononov@samara-metallurg.ru

определение условий контакта рабочего вала и заготовки в клетях пятиклетевого стана горячей прокатки 2800 при прокатке полос из алюминиевых сплавов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Толщина смазочного слоя определяется по формуле, полученной анализом условий равновесия элементарного объема, выделенного в слое плоско текущей вязкой жидкости [5]:

$$\xi = \frac{3\eta\theta(v_{\text{в}} + v_{\text{п}})}{\varphi(1 - e^{-\theta(\sigma_{\text{свх}} - \sigma_{\text{зад}})}), \quad (1)$$

где $v_{\text{в}}$ – линейная скорость вала;

$v_{\text{п}}$ – скорость движения металла во входном сечении очага деформации;

θ – коэффициент зависимости вязкости смазки от давления;

φ – угол захвата;

$\sigma_{\text{свх}}$ – предел текучести во входном сечении очага деформации;

$\sigma_{\text{зад}}$ – заднее натяжение;

η – динамическая вязкость масляной фазы смазки, рассчитывается по формуле:

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha \Delta P}, \quad (2)$$

где η_0 – вязкость жидкости при изначальном давлении;

α – коэффициент давления-вязкости;

ΔP – разница между изначальным и повышенным давлением.

Для расчета использованы параметры эмульсии, полученной на основе продукта Tandemol SAR 216/3 (присадка 1 – олеиновая кислота; присадка 2 – метиловый эфир лаурионовой кислоты) производства компании Houghton. Коэффициенты давления-вязкости были взяты из справочников [6] для современных минеральных масел. Значение предела текучести определялись по общепринятой модификации уравнения Холломоны для процессов горячей обработки давлением [7]:

$$\sigma_s = 1/\alpha \cdot \left(\operatorname{arcsch} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right), \quad (3)$$

где Z – это параметр Зенера–Холломоны, который описывает деформационное поведение металлических материалов при высоких температурах:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right), \quad (4)$$

A, α, n, Q – константы исследуемого материала, подлежащие определению регрессионным анализом по результатам экспериментов на установке Gleeble 3800 (см. таблица 1);

R – газовая универсальная постоянная, T – температура деформации (К).

Таблица 1 – константы различных сплавов для уравнений (3) и (4).

Сплав	n	α , МПа ⁻¹	A , с ⁻¹	Q , кДж/моль
АМг6	3,2	0,023	$5,2 \cdot 10^9$	174
АМг3	2,673	0,027	$6,551 \cdot 10^9$	171
АМц	5,7	0,03	$4,2 \cdot 10^9$	174

Комбинированная шероховатость рассчитывалась по формуле:

$$\rho = (R_{q1} + R_{q2})^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где R_{q1} и R_{q2} – среднее квадратичное отклонение профилей поверхности полосы и вала, замеренные при помощи профилометра SurfTest SJ-210.

Условия контакта определялись по соотношению толщины слоя смазки в очаге деформации (ξ) и комбинированной шероховатости поверхностей трения (ρ) [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } \xi/\rho < 1,2 - \text{граничное трение,} \\ \text{при } \xi/\rho = 1,2 \div 3,0 - \text{смешанный режим трения,} \\ \text{при } \xi/\rho > 3,0 - \text{гидродинамический (жидкостной) режим трения.} \end{array} \right. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Теоретическая толщина начальной пленки СОЖ (ξ_0) и её отношение к комбинированной шероховатости трущихся поверхностей (ρ) при использовании эмульсии на основе продукта Tandemol SAR 216/3 при различных условиях горячей прокатки лент из алюминиевых сплавов

Сплав	Толщина полосы на входе в валки, мм	Толщина полосы на выходе из валков, мм	Скорость на выходе из валков, м/мин	Объемная доля масляной фазы в эмульсии, %	Температура полосы, °С	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	ξ_0 , мкм	ρ , мкм	ξ/ρ
АМц	80,0	28,7	40	3%	70	6,7	0,48	1,2	0,40
	6,9	4,0	240	3%	330	11,1	0,58	0,7	0,83
	80,0	28,7	40	4%	470	6,7	0,62	1,2	0,52
	6,9	4,0	240	4%	330	11,1	0,76	0,7	1,09
	80,0	28,7	40	5%	470	6,7	0,75	1,2	0,63
	6,9	4,0	240	5%	330	11,1	0,95	0,7	1,36
	80,0	28,7	40	6%	470	6,7	0,87	1,2	0,73
	6,9	4,0	240	6%	330	11,1	1,13	0,7	1,61
АМг3	50,0	29,0	47	3%	440	7,2	0,51	1,2	0,43
	6,2	4,0	210	3%	330	20,0	0,58	0,7	0,83
	50,0	29,0	47	4%	440	7,2	0,66	1,2	0,55
	6,2	4,0	210	4%	330	20,0	0,76	0,7	1,09
	50,0	29,0	47	5%	440	7,2	0,81	1,2	0,68
	6,2	4,0	210	5%	330	20,0	0,94	0,7	1,34
	50,0	29,0	47	6%	440	7,2	0,95	1,2	0,79
	6,2	4,0	210	6%	330	20,0	1,12	0,7	1,60

Продолжение таблицы 2

АМг6	35	21,1	57	3%	410	8,6	0,52	1,2	0,43
	5,8	4,0	200	3%	340	21,8	0,58	0,7	0,83
	35,0	21,1	57	4%	410	8,6	0,68	1,2	0,57
	5,8	4,0	200	4%	340	21,8	0,76	0,7	1,09
	35,0	21,1	57	5%	410	8,6	0,84	1,2	0,70
	5,8	4,0	200	5%	340	21,8	0,95	0,7	1,36
	35,0	21,1	57	6%	410	8,6	0,99	1,2	0,83
	5,8	4,0	200	6%	340	21,8	1,14	0,7	1,63

Горячая прокатка полос из алюминия и его сплавов проходит при температуре полосы, во время черновых (предварительных) проходов достигающей 400–480 °С, во время чистовых (окончательных) проходов – 300–360 °С. При подобных условиях в случае формирования в области контакта условий граничного трения возможно налипание частиц оксида алюминия на поверхность вала за счет термодиффузии, разрушение структуры поверхности алюминиевой полосы и ее повышенная неоднородность. Данное явление, получившее название заалюминивания поверхности, проявляется в различной степени не только при горячей прокатке, но и других видах металлообработки [9]. Вследствие данного эффекта горячая прокатка в условиях граничного трения нежелательна, т.к. приводит к значительному ухудшению качества поверхности, что может сказаться как на внешнем виде, так и на свойствах конечного изделия при дальнейшей его деформации (вытяжке, изгибе и т.д.). При горячей прокатке в условиях гидродинамического трения полное разделение контактирующих поверхностей препятствует захвату полосы вальцами в начальный момент прокатки и повышает вероятность пробуксовки (отрицательного опережения) полосы в стане, что также нежелательно, т.к. приводит к нестабильности технологического процесса. Таким образом, оптимальным условием для прокатки алюминиевых полос является зона смешанного трения с предсказуемым влиянием вязкости СОЖ, скорости обработки и усилия прокатки на фактор трения.

Ключевым процессом, влияющим на условия трения при взаимодействии трущихся поверхностей с применением СОЖ, является образование жидкостной пленки и ее деформация в зоне контакта. Процесс формирования жидкостной пленки при контакте рабочего вала с поверхностью обрабатываемой полосы можно коротко описать следующий последовательностью. В начальный момент формируется жидкостный клин, обладающий различной начальной толщиной в зависимости от условий трения, вязкости и поверхностного натяжения СОЖ, после этого пленка СОЖ затягивается в зону деформации (зону Герца), где происходит эластическое растягивание пленки и увеличение ее вязкости под влиянием усилия деформации. Данный эффект получил название эластогидродинамического контакта. Согласно общепринятым в трибологии условиям (6), возможность эластогидродинамического контакта и возникновения фрикционного взаимодействия какого-либо из трех описанных выше видов трения зависит от отношения ξ/ρ . Согласно эластогидродинамической теории, в том случае, если ξ/ρ значительно больше 1, то контактирующие поверхности полностью разделены пленкой СОЖ, что соответствует условиям гидродинамического трения. При значении ξ/ρ близком к 1, возникают условия смешанного трения. При значении ξ/ρ значительно меньшем 1, возникают условия граничного трения.

В таблице 2 приведены характеристики сплавов АМц, АМг3 и АМг6, которые являются представителями групп сплавов разной твердости: мягких, средних и особотвердых соответственно. Из приведенных в таблице 2 данных следует, что применения 3% эмульсии недостаточно для обеспечения смешанного трения, и прокатка всех трех групп будет осуществляться в условиях граничного трения. Применение эмульсии с большим количеством эмульсии 4–6% позволяет рассчитывать на смешанный характер трения на пятой клети, но первая клеть все еще находится в условиях граничного трения.

ВЫВОДЫ

Анализ теоретически рассчитанного соотношения толщины масляного клина к комбинированной шероховатости трущихся поверхностей в соответствии с общепринятыми критериями в трибологии (6) позволяет сделать вывод, что во время горячей прокатки полос из алюминиевых сплавов

для черновых (предварительных) проходов при применении водомасляной эмульсии на базе продукта Tandemol SAR 216/3 (содержание масла от 3% до 6%) характерны условия граничного трения, а для чистовых (окончательных) проходов характерны условия смешанного (полужидкостного).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин, В.Н. Применение смазочно-охлаждающих технологических жидкостей в производстве прокатки листового материала : учеб. пособие / В. Н. Кокорин, Ю. А. Титов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 120 с.
2. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением : справ. / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 280 с.
3. Гречников, Ф.В. Теория пластического деформирования металлов / Ф. В. Гречников, В. Р. Каргин. – М.; Вологда: Инфа-Инженерия, 2023. – 448 с
4. Леванов, А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов [и др.] // Металлургия. – 1976. – № 416. – С. 45-52
5. Грудев, А.П. Теория прокатки : учеб. для вузов по спец. «Обработка металлов давлением» / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 360 с.
1. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
7. Callister W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction / W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch. – 8th ed. – New York : John Wiley & Sons, 2011. – 912 p.
8. Kolmogorov G. Hydrodynamic effect of technological lubrication and friction modes formation at sheet rolling / G. Kolmogorov, T. Melnikova // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. – Vol. 64. – P. 903–908.
9. Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства : учеб. пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – Санкт-Петербург : Наука, 2005. – 540 с.

CONDITIONS OF CONTACT INTERACTION OF WORKING ROLLS AND BLANKS DURING CONTINUOUS ROLLING OF ALUMINUM ALLOY STRIPS ON A FIVE-CELL HOT ROLLING MILL 2800

© 2025 V.V. Yashin, I.A. Latushkin, E.V. Aryshenskiy, E.A. Suzdaltsev, M.A. Lapshov, S.V. Kononov

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

³ Samara Metallurgical Plant, Samara, Russia

In this work, a method was developed for calculating the thickness of the lubricating film in the deformation zone during hot rolling of aluminum alloy strips on a five-cell 2800 mill. The conditions of contact interaction between the working rolls and the workpiece are investigated, taking into account the modes of friction (dry, boundary and liquid). It was found that when using a water-oil emulsion with an oil phase content of 3-6%, the boundary tension prevails in the first three cages.

Keywords: hot rolling, aluminum alloys, friction, lubricating membrane, five-cell mill.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-142-146

EDN: RBSYCL

REFERENCES

1. Kokorin, V.N. The use of lubricating and cooling process fluids in the production of rolling sheet material : textbook. manual / V. N. Kokorin, Yu. A. Titov. – Ulyanovsk: – UISTU, 2004. – 120 p.
2. Grudev, A.P. Friction and lubricants in metal processing by pressure : references / A. P. Grudev, Yu. V. Zilberg, V. T. Tyk. – М.: Металлургия, 1982. – 280 p.
3. Grechnikov, F.V. Theory of plastic deformation of metals / F. V. Grechnikov, V. R. Kargin. – Moscow ; Vologda : Infa-Engineering, 2023. – 448 pages
4. Levanov, A.N. Contact friction in metal pressure treatment processes / A. N. Levanov [et al.] // Metallurgy. – 1976. – No. 416. – pp. 45-52
5. Grudev, A.P. Theory of rolling : textbook. for universities on spec. “Metal processing by pressure” / A. P. Grudev. – М.: Металлургия, 1988. – 360 p.
6. Vargaftik, N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids / N. B. Vargaftik. – М.: Наука, 1972. – 720 p.
7. Callister W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction / W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch. – 8th ed. – New York: John Wiley & Sons, 2011. – 912 p.
8. Kolmogorov, G. Hydrodynamic effect of technological lubrication and friction modes formation at sheet rolling / G. Kolmogorov, T. Melnikova // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. – Vol. 64. – P. 903-908.
9. Rudskoy, A.I. Theory and technology of rolling production : textbook. manual / A. I. Rudskoy, V. A. Lunev. – Saint Petersburg: Nauka Publ., 2005. – 540 p.

Vasily Yashin, Candidate of Technical Sciences, Furnace Equipment Manager. E-mail: Vasily.Yashin@samara-metallurg.ru

Ilya Latushkin, Specialist in Technological Adjustment. E-mail: Ilya.Latushkin@samara-metallurg.ru

Evgeny Aryshenskiy, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metalworking by Pressure and Materials Science of EVRAZ ZSMK. E-mail: arishenskiy_ev@sibsiu.ru

Egor Suzdaltsev, Student. E-mail: Maksim.Lapshov@samara-metallurg.ru

Maxim Lapshov, Design Engineer. E-mail: Maksim.Lapshov@samara-metallurg.ru

Sergey Kononov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering. E-mail: kononov@sibsiu.ru