

А. Д. Шамровский. – Математическое моделирование физико-математических полей и интенсификация промышленного производства, 1995. – С. 43–50.

10. Шамровский, А. Д. Решение уточненных уравнений. Пример внезапно приложенного на торце изгибающего момента [Текст] / А. Д. Шамровский, Л. Н. Егармина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий: Прикладная механика – 2011. – Т. 3, № 7 (51). – С. 52–55. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/1617/1514>

*В процесі вивчення осередку деформації при подовжньому прокатуванні виконано аналіз складного напружено-деформованого стану металу з точки зору реологічної концепції. Визначено критерії Прандтля, Пекле, Рейнольдса і Фруда, в'язкість сталі в осередку деформації для заданих режимів обробки. Встановлено, що течія металу при прокатці відбувається ламінарно, а не турбулентно, контактний теплообмін здійснюється переважно конвективно, а не молекулярно*

*Ключові слова: осередок деформації, реологічні властивості, течія металу, режими обтиснень, напруження*

*В процессе изучения очага деформации при продольном прокатывании выполнен анализ сложного напряженно-деформированного состояния металла с точки зрения реологической концепции. Определены критерии Прандтля, Пекле, Рейнольдса и Фруда, вязкость стали в очаге деформации для заданных режимов обработки. Установлено, что течение металла при прокатке происходит ламинарно, а не турбулентно, контактный теплообмен осуществляется преимущественно конвективно, а не молекулярно*

*Ключевые слова: очаг деформации, реологические свойства, течение металла, режимы обжатий, напряжение*

УДК 621.771

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38059

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ПРОКАТЫВАНИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ

**Н. Н. Бережной**

Доктор технических наук, профессор\*

**В. А. Чубенко**

Кандидат технических наук, доцент\*

**А. А. Хиоцкая**

Старший преподаватель\*

**С. О. Мацшин**

Ассистент\*

E-mail: sergej.macyshin@inbox.ru

**В. А. Чубенко\*\***

\*Кафедра обработки металлов давлением  
и материаловедения\*\*

\*\*ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

Криворожский металлургический институт

ул. 22-ого Партсъезда, 11,

г. Кривой Рог, Украина, 50027

### 1. Введение

Теория и технология прокатного производства на сегодняшний день достигли значительных успехов. Но существует большое количество недостаточно обоснованных допущений для упрощения расчетов [1], что снижает их точность. Теория прокатного производства основывается на теории упругости и пластичности твердых тел, где рассматриваются напряжения и деформации в сплошных средах вследствие пластической деформации и нагревания металла. При описании механических процессов, которые происходят в очаге деформации при прокатке металлов, используют понятия «течение», «текущее», «ползучее», которые недостаточно полно рассмотрены с реологической точки зрения.

Поэтому изучение процессов, которые происходят в очаге деформации при прокатывании, – задача актуальная. Для этого возникает необходимость определить такие критерии подобия, как критерий Прандтля, Пекле, Рейнольдса и Фруда, а также вязкость металла в очаге деформации, что позволит определить характер течения металла, характер теплопереноса в очаге деформации и повысить точность расчетов.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Теория прокатного производства основывается на теории упругости и пластичности твердых тел,

где рассматриваются напряжения и деформации в сплошных средах в результате пластической деформации и нагревания металла. Наиболее мощным средством решения задач теплопереноса при обработке металлов давлением, обобщения экспериментальных и расчетных данных является теория подобия и моделирования, а определение критериев подобия и вязкости металла в очаге деформации в зависимости от используемых режимов обжатий для изучения контактного теплообмена в очаге деформации при прокатывании является актуальной научно-технической задачей.

Теория и технология прокатного производства на сегодняшний день достигли существенных результатов в повышении производительности оборудования и качества готовой продукции. Но наличие определенного количества допущений в современной теории продольной прокатки и противоречий снижает точность теоретических расчетов и адекватное понимание сути физических явлений [1].

Такие упрощения расчетов, обобщенных в современной теории продольной прокатки и противоречия в ней, делают актуальными задачи реологической концепции в теории обработки металлов давлением. В связи с чем, существует необходимость детального рассмотрения течения металла и контактного теплообмена в очаге деформации при обработке.

При прокатывании образуется очаг деформации, которому в теории обработки металлов давлением, уделяется большое внимание. В этом очаге деформации возникает сложное напряженно-деформированное состояние металла [2–4]. При описании механических процессов, происходящих в очаге деформации при продольной прокатке металлов, используют понятие "течение", "текучесть", "ползучесть" и другие, которые применяются в механике жидкостей и газов [5]. Но с гидродинамики для описания процесса прокатки взято только закон постоянства секундного объема (массы) через поперечное сечение потока. Исследованиями процессов пластического формирования реальных (реологически сложных) металлов обнаружено [5], что закономерности развития их деформации принципиально отличаются от устоявшихся взглядов. Это направление позволило развить представление о реологических свойствах металлов. Наиболее существенный вклад в расширение, детализацию и углубление современного представления о процессах в очаге деформации сделано Г. Г. Шломчаком в связи с разработанной им реологической теорией металла при обработке давлением [6].

Методы реологии начали применяться с целью оперативного управления технологическими процессами. При этом осуществляется непрерывное или периодическое определение одного или нескольких реологических свойств материала по заданной программе и с использованием обратной связи. Основная задача реологии – установить зависимость между механическими напряжениями, возникающими в теле, и вызванными ими деформациями и изменение их во времени [7].

Прокатка может происходить как в горячем, так и в холодном состоянии. Каждый из этих видов сопровождается тепловыделением, где происходит перенос

теплоты. В первом случае, металл перед обработкой нагревают до температуры 1100...1350 °С, в зависимости от марки стали. Во втором – металл нагревается в процессе обработки. Это все приводит к возникновению дополнительных напряжений и деформаций. В свою очередь тепло выделяется в окружающую среду и рассеивается.

Оптимизация технологических процессов при прокатке, связанных с переносом и использованием тепловой энергии, предъявляет все более новые требования к расчету теплообмена [8]. Детальное описание теплообмена, обеспечивающее достаточное совпадение расчетных данных с результатами экспериментальных исследований возможно на основе использования системы интегральных уравнений, описывающих перенос энергии при теплоотдаче. Для существенного упрощения решения таких задач используются теории подобия и моделирования. Подобными называются физические явления, которые протекают в подобных системах, если у них во всех сходных точках в сходные моменты времени отношения одноименных параметров есть постоянные числа. Эти числа и есть критерии подобия [8].

Решая вопросы реологии, необходимо определить, как происходит течение металла – ламинарно или турбулентно; как совершается перенос тепла при контактно-теплообмене в очаге деформации – молекулярно или конвективно.

Для упрощения многопараметрических исследований процесса теплопереноса необходимо установить безразмерные реологические критерии подобия для конкретных условий прокатки, такие как, критерии Прандтля, Пекле, Рейнольдса и Фруда, так же вязкость металла в очаге деформации, которые ранее другими исследователями не определялись.

---

### 3. Цель и задачи исследования

---

Целью настоящей работы является определение чисел Прандтля, Пекле, Рейнольдса и Фруда, вязкость стали в очаге деформации для заданных режимов обработки, что позволит обосновать определяющие соотношения при построении механических моделей, учитывающих высокую скоростную чувствительность и механизм изменения внутренней структуры материала. Это даст возможность определить, какое преобладает течение металла в очаге деформации – ламинарное или турбулентное, как происходит перенос тепла – молекулярно или конвективно, а также покажет, какие модели лучше использовать для упрощения расчетов при изучении контактного теплообмена в очаге деформации при прокатывании.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- проанализировать процессы течения металла в очаге деформации при прокатке, которые сопровождаются пластическими изменениями;
- исследовать очаг деформации при прокатывании по критериям Рейнольдса и Фруда;
- изучить очаг деформации по критерию Пекле;
- определить, каким законам подчиняется очаг деформации при прокатывании в отношении вязкости.

**4. Исследование реологических критериев при продольном прокатывании**

Чтобы провести всестороннее исследование рассматривались все три вида температурной обработки: горячая, теплая и холодная прокатка. Были применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Для этого были подобраны различные температурные режимы и менялись величины обжатия на разных прокатных станах (табл. 1) [5]. Горячая прокатка использовалась в исследованиях при обработке слитков и слябов, где выполнялись существенные обжатия и для изготовления слябов и толстых листов, где обжатия давались не столь значительные. Холодная прокатка применялась при обработке тонкого листа. Исследования проводились на слябинге, на листовом прокатном стане 2800, холодная обработка – на стане 2000. На данном оборудовании изменялись режимы обжатия и температура прокатки. Из табл. 1 видно, что были выбраны 5-ть режимов: 1-й режим выполнялся на стане холодной прокатки; 2-й и 3-й на листовых станах; 4-й и 5-й - на слябинге. Исследования выполнялись по схеме, приведенной на рис. 1. В качестве материала для экспериментального исследования использовался стальной слиток из низкоуглеродистой стали марки Сталь 20. Перед горячей прокаткой слиток нагревался по 5-му режиму до температуры 1300 °С; по 4-му режиму – до 1250 °С; по 2-му и 3-му режиму – до 900 °С; по 1-му режиму слиток нагревался не перед прокатыванием, а в процессе обработки. При прокатке фиксировалось уменьшение высоты полосы и увеличение ее ширины, а также рассчитывались углы захвата, определялась скорость на входе и выходе с очага деформации, а результаты заносились в табл. 1. Далее эти значения использовались в расчетах.

Изменение формы и размеров исследуемого материала возможно потому, что сталь поддается пластической деформации. Решающее влияние на процесс обработки давлением оказывает вязкость образца, которая показывает его способность поглощать механическую энергию (работу) при обжатии. Уровень вязкости способен изменяться при переходе от одного режима деформации к другому, т. к. она зависит не только от свойств обрабатываемого материала, а также и от температуры, скорости прокатки, от величины обжатия, схемы напряженного состояния. Для определения вязкости стали в очаге деформации была модифицирована формула Хагена-Пуазейля, которая описывает процессы течения материала. Эта формула, в процессе исследования, была разделена на две составляющие: геометрическую и силовую [9]. Геометрическая составляющая зависит от размеров исследуемого образца, а силовая – от свойств обрабатываемого материала. Результаты расчетов занесены в табл. 2.

Параметры, которые характеризуют текучесть стали в очаге деформации – это критерии Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr). Течение металла в очаге деформации при прокатывании обеспечивается окружной скоростью контактной поверхности валков, а линейная скорость движения полосы зависит от окружной скорости движения валков. При больших числах Рейнольдса, как и Фруда, главную роль в процессе играет инерция, а при небольших – вязкость (табл. 2).

Таблица 1

Параметры прокатывания в характерных случаях

№ п.п.	$\alpha_3, \text{°}$	$\alpha_y, \text{°}$	$h_0, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	$\Delta h, \text{мм}$	$b_0, \text{мм}$	$b_1, \text{мм}$	$\Delta b, \text{мм}$	$V_0, \text{м/с}$	$V_1, \text{м/с}$	$R_B, \text{мм}$
1*	4	2,4	2	1,92	0,08	1000	1010	10	20	20,6	60
2	15	11,54	100	92	8	1000	1100	100	10	10,35	200
3	24	18,5	200	180	20	1000	1150	150	8	8,1	300
4	29	22,3	300	255	45	1000	1170	170	5	5,12	400
5	34	26	500	400	100	1000	1200	200	3	3,2	500

Примечание: \* – 1 – листовые станы холодной прокатки; 2, 3 – листовые станы горячей прокатки; 4 и 5 – блюминги и слябинги;  $\alpha_3$  и  $\alpha_y$  – углы захвата в начальном периоде прокатки и установившемся;  $\Delta h$  – обжатие при прокатке;  $\Delta b$  – уширение при обжатии;  $R_B$  – радиус валков.

Таблица 2

Результаты расчетов вязкости, чисел Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr)

Номер режима	Время $\tau_{пр}, \text{с} \cdot 10^{-6}$	Температура $t_p, \text{°C}$	Re	Fr	Граница течения $\sigma^t, \text{кДж/кг}$	Вязкость $\eta, \text{кПа} \cdot \text{с}$
1	1,3	30	0,048	817,9	14,4	12,68
2	3867	900	1,56	25,93	8,8	4,222
3	11520,6	900	2,425	8,62	6,62	4,834
4	27518,7	1250	1,36	3,38	3,23	7,858
5	74248,5	1300	0,38	1,443	6,85	28,297

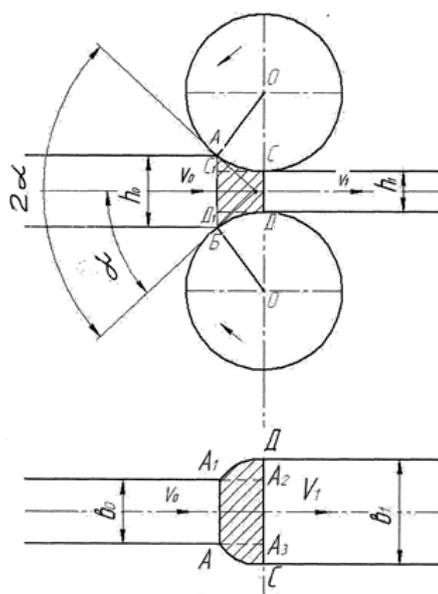


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатывании:  $h_0$  и  $h_1$  – высота полосы до прокатывания и после;  $b_0$  и  $b_1$  – ширина полосы до прокатывания и после;  $\alpha$  – угол захвата;  $V_0$  и  $V_1$  – скорость прокатки на входе в очаг деформации и выходе; АСДБД<sub>1</sub> С<sub>1</sub> и А<sub>1</sub>А<sub>2</sub> А<sub>3</sub> А – линии, ограничивающие очаг деформации

Из табл. 2 видно, что критерий Фруда с увеличением температуры прокатывания уменьшается с 817,9 до 1,443, критерий Рейнольдса имеет малые значения от 0,04 до 2,425 и от режимов прокатывания не зависит, а зависит от вязкости стали. Вязкость принимает значения от 4,222 до 28,297 и от режимов обработки не зависит, а зависит от границы течения металла в очаге

деформации, т. е. решающее влияние на нее оказывает силовая составляющая формулы Хагена-Пуазейля.

Таким образом, полученные значения критериев Рейнольдса и Фруда подтверждают теорию моделирования процессов в том, что при больших значениях этих чисел главную роль играет инерция в холодных процессах прокатывания, а при малых – в процессах горячего прокатывания – вязкость и трение. Данные числа показывают, что металл в очаге деформации приобретает течение ламинарное, а не турбулентное. Это дает возможность исследовать контактный теплообмен металла в очаге деформации с точки зрения реологии, используя критерии Пекле и Рейнольдса.

При прокатывании большое количество тепла, которое образуется в результате нагревания исходных материалов, а также от самой пластической деформации, выделяется в окружающую среду. Чтобы выяснить, каким образом происходит контактный теплообмен в очаге деформации при обработке, использовался критерий Пекле.

Критерий Пекле (Pe) – это критерий подобия, который характеризует отношение между конвективным и молекулярным процессами переноса тепла в потоке жидкости (отношение конвекции и диффузии), а также является критерием подобия для процессов конвективного теплообмена. Используется этот критерий при построении расчетных схем дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих течения вязкой жидкости. Критерий Пекле определяется по формуле:

$$Pe = \frac{c_p \rho v_{cp} L}{\chi} \tag{1}$$

$$L = 2\sqrt{R_B \Delta h}$$

где L – длина контакта полосы с вальцами, которая равняется удвоенному очагу деформации, м;  $v_{cp}$  – средняя скорость прокатки, соответствующая заданным режимам [5, 9, 10], м/с, определялась, как среднее арифметическое между скоростью полосы на входе в очаг деформации и на выходе из него;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности, который для стали равен 47 Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность, для стали в жидком состоянии равна 7800 кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – теплоемкость, для стали равна 0,462 кДж/(кг·К);  $R_B$  и  $\Delta h$  принимаются по режимам (табл. 1) [5, 9, 10].

При малых значениях критерия Пекле происходит молекулярная теплопроводность, а при больших – конвективный перенос.

Результаты расчетов критерия Пекле, выполненные по формуле (1) в соответствии с заданными режимами прокатывания приведены в табл. 3, где видно, что он обратно пропорционален скорости прокатывания и принимает значения от 7,77 до 131,78, т. е. во всех случаях прокатывания – больше единицы. Это свидетельствует о том, что при пластической деформации преобладает конвективный теплообмен над молекулярным. Так как с повышением температуры прокатки критерий Пекле увеличивается, то увеличивается и степень преобладания конвективного теплообмена над молекулярным.

Также критерий Пекле можно определить по формуле:

$$Pe = Re Pr, \tag{2}$$

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\chi} \tag{3}$$

где Pr – число Прандтля; Re и  $\eta$  – принимаются по рекомендациям [5, 9].

Число Прандтля – это один из критериев подобия тепловых процессов в жидкостях, который учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплопередачу и представляет собой отношение скорости диффузии к температуропроводности. Число Прандтля является мерой отношений толщин динамического и температурного пограничных слоев и показывает отношение кинематической вязкости теплоносителя к температуропроводности [8].

Подставив значения формулы (3) в формулу (2), получим:

$$Pe = Re \frac{\eta c_p}{\chi} \tag{4}$$

Таким образом, получена новая формула для определения критерия Пекле, который прямо пропорционален вязкости среды и обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности.

Для проверки адекватности данной формулы критерий Пекле был рассчитан двумя способами: по формуле (1) и по формуле (4). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Реологические свойства очага деформации при прокатке по критериям Пекле и Прандтля

№ режима по [5]	По формуле (1)			По формуле (4)			Погрешность, %	
	контактная поверхность, м <sup>2</sup>	$v_{cp}$ , м/с	Pe	Re	$\eta$ , кПа·с	Pr		Pe
1	0,005	20,3	7,77	0,048	12,63	120	5,76	25
2	0,082	10,17	63,9	1,56	4,84	40	62,4	2
3	0,203	8,05	125,17	2,452	4,83	40	98	21
4	0,34	5,06	131,78	1,36	7,86	70	95	27
5	0,5	3,2	118,7	0,38	28,3	280	106	10

Из табл. 3 видно, что критерий Пекле, рассчитанный по формуле (4), с повышением температуры увеличивается с 5,76 до 106. Эти значения доказывают, что возможна как молекулярная теплопроводность, так и конвективная.

Таким образом, валок при прокатке охлаждается конвективно, а в самом очаге деформации существует молекулярная теплопроводность. В связи с тем, что критерий Пекле больше единицы, то теплообмен происходит преимущественно конвективно. Причем, с повышением температуры конвективность увеличивается.

Критерий Прандтля, согласно расчетам (табл. 3) больше единицы, что характерно для вязкого тела. Это дает обоснование того, что при моделировании процесса прокатки рекомендуется использовать модель среды, которая подчиняется законам вязкости Ньютона.

Полученная информация позволяет более точно определить внутренние напряжения металла и перенос энергии при прокатке.

---

## 5. Выводы

---

1. Выполнен анализ процессов течения металла в очаге деформации при прокатке, которые сопровождаются пластическими изменениями, что делает необходимым очаг деформации считать реологически сложной средой.

2. Исследованиями очага деформации по критериям Рейнольдса и Фруда впервые установлено, что течение металла в нем – ламинарное, наибольшее влияние на значения чисел Рейнольдса и Фруда имеют температура и давление через значение вязкости или предел текучести.

3. Изучение очага деформации по критерию Пекле подтвердило, что при прокатке возможен как молекулярный, так и конвективный теплообмен, но впервые доказано, что преобладает конвективный.

4. Установлено, что очаг деформации необходимо рассматривать как сплошную вязкую среду, которая подчиняется законам и формулам вязкости Ньютона.

5. Проведенные исследования дают возможность выполнять более точные расчеты напряжений и деформаций, которые возникают в очаге деформации при прокатке и в результате нагрева металла.

---

## Литература

1. Василев, Я. Д. Теорія повздовжньої прокатки [Текст] / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: ТОВ «Технопарк ДонДТУ «УНІТЕХ», 2009. – 488 с.
2. Faraji, G. Accumulative Torsion Back (ATB) Processing as a New Plastic Deformation Technique [Text] / G. Faraji, H. Jafarzadeh // Materials and Manufacturing Processes. – 2012. – Vol. 27, Issue 5. – P. 507–511. doi: 10.1080/10426914.2011.593235
3. Kodjaspurov, G. E. Advanced Severe Plastic Deformation Techniques for Processing Bulk Nanostructured Metal Production [Text] / G. E. Kodjaspurov, A. I. Rudskoy // NANONECH' 2009, Italy, Rome. – 2009. – P. 125–128.
4. Kodjaspurov, G. E. Effect of thermomechanical processing on structure and corrosion-mechanical properties of AISI 321 steel [Text] / G. E. Kodjaspurov, A. I. Rudskoy, V. V. Rybin // Advanced Materials Research. – 2010. – Vol. 89-91. – P. 769–772. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.89-91.769
5. Бережний, М. М. Енергетичний баланс та реологічні властивості осередку деформації при прокатуванні штаби гладкими валками [Текст] / М. М. Бережний, В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька. – Кривий Ріг: Діоніс, 2011. – 120 с.
6. Shlomchak, G. G. Deformation Anomalies of Higher Order during the Plastic Extension of Rheologically Complex Materials [Text] / G. G. Shlomchak, I. Mamuzc, F. Voclopilec // F Kovine, Zlitrine, tehnologije, letnik 28, Ljubljana. – 1994. – St. 4. – P. 583–587.
7. Шломчак, Г. Г. Развитие представлений о высоком очаге деформации [Текст] / Г. Г. Шломчак // Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 38–42.
8. Цаплин, А. И. Теплофизика в металлургии [Текст] / А. И. Цаплин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. тех. ун-та, 2008. – 230 с.
9. Бережний, М. М. Реологічні властивості потоку металу в осередку деформації при повздовжньому прокатуванні [Текст] / М. М. Бережний, В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2013. – № 1 (14). – С. 62–68.
10. Бережний, М. М. Набуття сталлю реологічних властивостей в осередку деформації при прокатуванні [Текст] / М. М. Бережний, В. А. Чубенко, А. А. Хіноцька. – Кривий Ріг: Діоніс, 2014. – 155 с.