

СПОРНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРОТИВОРЕЧИЯ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ПРОКАТКИ

Огинский И. К. /д. т. н./

Национальная металлургическая академия Украины

The analysis of controversial points and contradictions in the up-to-date rolling theory had been carried out. The causes originating contradictions had been revealed and suggestions as to minimization of the controversial points of the rolling theory had been elaborated. The state of the theory of plastic friction while rolling had been elucidated. The knowledge of the physical meaning of sticking phenomenon, the purpose and role of the latter had been extended. It was established that zone of sticking presents a section of the contact surface, which ensures the frictional connection of roll with metal and by means of it the work of deformation. This conclusion is based on the principle of the work minimum, kinematic signs and principles of tribology. The knowledge about the mechanism of creep and backward creep advent is extended, as well as knowledge of their intercommunication with sticking.

Выполнен анализ спорных положений и противоречий современной теории прокатки. Выявлены причины, порождающие противоречия, выработаны предложения по минимизации спорных положений теории прокатки. Освещено состояние теории пластического трения при прокатке. Расширены представления о физическом смысле явления прилипания, его назначении и роли при прокатке. Установлено, что область прилипания представляет собой участок контактной поверхности, который обеспечивает фрикционную связь вала с металлом, а тем самым и работу деформации. Вывод основан на принципе минимума работы, кинематических признаках и принципах трибологии. Расширены представления о механизме образования опережения и отставания, их взаимосвязи с прилипанием.

Тема спорных положений и противоречий современной теории прокатки, будучи не новой, не утратила своей актуальности, остроты и дискуссионности. Подтверждением являются публикации последних лет [1-5]. К числу более ранних относятся работы А.И. Целикова, И.М. Павлова, В.Н. Выдрина и других авторов. Активно развивающиеся методы компьютерного моделирования по причине отсутствия достаточно полных сведений о физической стороне процесса не учитывают в достаточной мере особенности реального процесса. По этой причине результаты компьютерного моделирования процесса прокатки не всегда вызывают положительную оценку, например, автор [2], отмечая перспективность современных методов, по поводу их результатов утверждает следующее: «Экспериментальные методы предаются забвению, во многих теоретических исследованиях прокатки недопустимо упрощают физическую сущность процесса, используют модели, далекие от реального процесса прокатки. Единственным результатом подобных исследований может быть лишь информационный шум». Современные подходы к компьютерному моделированию процессов прокатки заключаются в направлении совершенствования математического аппарата, в поиске и создании удачных формулировок условий, например, несжимаемости и непроницаемости. При этом недостаточное внимание уделяется постановке задачи, тестированию модели и результатов моделирования, не привлекаются для этих целей экспериментальные исследования. Основой любого теоретического решения является корректно обозначенные начальные условия и в этой связи весьма актуальным продолжает оставаться высказывание И.Я. Тарновского и авторов работы [6, с. 158]:

«...заданная точность математического решения поставленной задачи не должна превосходить точности теории, на которой построено это решение и точности формулировки граничных условий...». Авторы [6] приводят свое высказывание по причине того, что теория прокатки содержит во многом феноменологическую основу, которая не всегда и недостаточно полно бывает отражена в постановках и решениях теоретических задач. Высказывание И.Я. Тарновского и авторов работы [6] следует понимать как утверждение, что постановка задачи должна быть точнее, чем решение.

Целью настоящей работы является освещение и систематизация причин, порождающих противоречия, установление причинно-следственной связи между ними и выработка предложений по минимизации спорных положений.

Процесс прокатки построен на трении и необходимым условием успешного решения теоретической или прикладной задачи прокатки является удачный выбор и использование имеющихся научных достижений в области пластического трения. Многие противоречия берут свое начало в различных подходах к таким основополагающим понятиям: особенности и закономерности пластического трения; взаимосвязь внешнего и внутреннего трения; применимость к процессу прокатки законов, условий и моделей трения; коэффициент и/или показатель трения. Общие закономерности пластического трения, пригодные для решения достаточно широкого класса задач теории прокатки, не выявлены. Об этом свидетельствует различие взглядов [7-9], дискуссионность и прямо противоположные точки зрения [10-19]. Существуют различные точки зрения на природу внешнего трения при прокатке, по-разному воспринимается применимость

законов и моделей трения [11-16, 18-24]. Единство мнений по вопросам контактного взаимодействия не достигнуто, более того, обсуждение порой носит острый дискуссионный характер [11-14, 18, 19]. По мнению одного из авторов дискуссии [14, с. 27]: «...в понимании пластического трения все еще возможны сильные различия». Отсутствие единства мнений по основным положениям пластического трения усложняет решение задач, делает их результаты неоднозначными в оценках.

Неоднозначность взглядов на природу пластического трения, в свою очередь порождает дискуссионность в вопросах силового и кинематического взаимодействия металла с валками [1, 3, 4, 25-28]. Существуют серьезные различия в объяснениях природы опережения, начиная с первых работ [29] и в последующих [28, 30-37], в представлениях о природе прилипания [38-41], их взаимосвязи с другими параметрами [4, 27, 31, 33, 39, 42-52]. В последнее время стали появляться публикации, в которых приводятся сведения о случаях устойчивого проявления отрицательного опережения [53-56]. Причем некоторые объяснения его возникновения не согласуются с существующими принципами образования опережения в привычном (положительном) значении. Новым кинематическим признаком процесса прокатки, по мнению авторов [40, 57, 58], является наличие еще одного нейтрального сечения в очаге деформации. Все вышесказанное относится к простым случаям, еще более нераскрытыми в части кинематики и взаимосвязи с деформационными параметрами становятся более сложные случаи, например, прокатка в калибрах.

Контактное взаимодействие металла с валком при прокатке носит качественно другой характер нежели при других видах обработки металлов давлением, в частности, это относится к прилипанию. Прилипание продолжает оставаться наиболее спорным вопросом в теории прокатки. Мнения по его поводу самые различные – от полного отрицания до признания, но объяснения при этом часто носят прямо противоположный характер. Прилипание при прокатке взаимосвязано с другими проявлениями на контакте, в том числе, с опережением, о котором стало известно достаточно давно (во второй половине 19-го столетия), но, в природе которого остаются невыясненные обстоятельства [2]. О прилипании стали говорить значительно позже, многие исследователи продолжительное время ставили под сомнение наличие зоны прилипания, или, по меньшей мере, возможность ее протяженности в пределах всей площади контакта. Открытие прилипания не внесло ясности в понимание явления опережения и процесса прокатки в целом, напротив, породило множество различных точек зрения [25-27, 43, 44, 59] и такое состояние сохраняется по настоящее время, об этом говорится, в частности, в работах [2, 3]. Автор в работе [2] справедливо отмечает неустановленные взаимосвязи между опережением, уширением и вытяжкой: «Несмотря на многочисленные исследования в теории прокатного производства сохранились противоре-

чия относительно взаимозависимости основных показателей процесса». Автор [2] в своих работах затрагивает также вопросы прилипания во взаимосвязи с названными выше параметрами; в части зависимости опережения от относительного обжатия он отмечает следующее: «...Отмечен аномальный рост опережения при повышенных обжатиях, который не может быть объяснен с позиции современной теории прокатки». Автор [2], делая шаги в направлении решения проблемных вопросов, опираясь при этом на базовые положения теории, одновременно высказывает положения, которые воспринимаются неоднозначно и тоже могут быть расценены как спорные.

Говоря о прилипании при прокатке, обычно основоположником темы называют Соболевского Н.А. [60], хотя правильнее считать его последователем, поскольку известны работы С. Экелунда, в которых принималось для одной трети дуги захвата в выходной части сплошное прилипание металла к валкам, а для двух третей (во входной части дуги контакта) – трение скольжения (эти сведения приводит автор [61]). Экелундом было выдвинуто предположение, что в зоне сплошного прилипания происходит выдавливание металла вперед. Автор [62, с. 450] приводит другой факт из истории развития теории прокатки: «В 1909 г. проф. В.Е. Грум-Гржимайло говорил о прилипании так: «В процессе прокатки развито скольжение, но имеется узкая лента прилипания около линии центров валков... Развивающееся явление опережения зависит от всех условий прокатки...». Периодом признания существования прилипания в той или иной форме можно считать вторую половину прошлого века, к началу 60-х годов дискуссии еще сохраняли свою остроту [62-70].

При всем том, что в настоящее время существование зоны прилипания (или, по меньшей мере, возможность ее существования при определенных обстоятельствах) признается в большинстве работ, достаточной ясности в этом вопросе не достигнуто. Исследователи во все времена больше внимания уделяли опережению, поскольку оно участвует в расчетах скоростных режимов при непрерывной прокатке. Прилипание и отставание считались сопутствующими явлениями и, возможно, по этой причине природа прилипания до настоящего времени в достаточной мере не раскрыта и продолжает существовать многообразие мнений относительно причин его образования. В период развития основ теории прокатки на страницах печати возникали дискуссии, высказывались самые различные и порой противоположные точки зрения [25, 26, 43]. Существование прилипания в настоящее время перестало вызывать сомнения, его проявление установлено прямыми методами, встречаются данные о протяженности зоны прилипания, ее протяженность учитывают в расчетах технологических параметров [71, 72], но объяснения природы его возникновения и назначения продолжают оставаться неполными.

Перемещение металла по контактной поверхности при прокатке в целом как явление представляет

собой сложную многофакторную картину; во взглядах на природу прилипания при прокатке установилось мнение, что оно является следствием действия сил внешнего трения, в отношении действия остальных технологических факторов мнения расходятся. В подтверждение того, что мнения о природе прилипания весьма противоречивы, можно привести несколько высказываний. Авторы [6, с. 459] видят взаимосвязь между существованием зоны прилипания и неравномерностью деформации: «...даже при отсутствии зоны прилипания вполне возможна неравномерность деформации. Последняя лишь усиливается при наличии зоны прилипания». Автор [73, с. 23] утверждает следующее: «Зона прилипания усиливает неравномерность деформации...». Другими словами авторы [6, 73] неравномерность деформации ставят в зависимость от прилипания. Автор [74] во взаимосвязи прилипания с неравномерностью деформации видит обратную причинно-следственную связь: «На протяженность зоны прилипания оказывает влияние неравномерность деформации по высоте. При равномерной деформации протяженность зоны прилипания очень мала или отсутствует». То есть, ставится в зависимость прилипания от неравномерности деформации. Автор [7, с. 77] говорит о причинах возникновения зоны прилипания с позиций закона минимального расхода энергии, приводя свое высказывание в самом общем виде: «Если условия расхода энергии таковы, что затраты энергии на внутренние сдвиги меньше чем на внутреннее скольжение, то на контактной поверхности образуется зона прилипания». В теории прокатки установилось мнение, что зона прилипания должна находиться в средней по длине очага деформации части, такой вывод сформировался на основе аналогии с осадкой. Встречаются работы, в которых исследователи обращаются к случаям полного прилипания на контакте. Автор работ [2, 3], отмечая существование спорных положений в современной теории прокатки, затрагивает вопросы прилипания во взаимосвязи с опережением и вытяжкой, считая их первичными факторами, отмечает противоречивость, по его мнению, взглядов других исследователей и одновременно, ссылаясь на результаты своих экспериментальных исследований, утверждает [2, с. 43]: «...на контактных поверхностях имеет место полное прилипание, но процесс прокатки протекает вполне нормально...». Говоря о нормальности протекания процесса прокатки в связи с полным прилипанием, автор выражает свою позицию, которую можно понимать как то, что прилипание при определенных обстоятельствах (например, при полном прилипании на контакте) становится недостаточно желательным явлением. В дискуссии, возникшей между авторами [25, 26] и [43], высказываются прямо противоположные точки зрения. Автор [43] связывает появление прилипания с развитием уширения: «При отсутствии уширения область деформации делится на две зоны (I и II); при развитии уширения появляется третья – зона прилипания»; подчеркивается это и

в выводах. Автор [26, с. 252] категоричен в своем утверждении: «все положения И. К. Суворова, содержащиеся в его статье (имеется в виду статья [43]), следует признать неправильными». Исследователи, рассматривая задачи кинематического взаимодействия металла с валком, вопросы прилипания часто исключают из рассмотрения (по меньшей мере, в той степени, в которой это необходимо) [26-28, 31-33, 35, 45, 53]. Авторы [36], исследуя опережение, делают допущение, что прилипание отсутствует. Автор [35, с. 24], не привлекая к рассмотрению прилипания, утверждает: «...опережение при прокатке является функцией двух параметров: обжатия полосы и скорости входа металла в валки». Зависимость от второго фактора, по нашему мнению, является более чем спорной. Автор [4], отмечая существование противоречий и допущений в теории прокатки, делает акцент на участии трения в формировании деформационных и кинематических показателей, вопросы прилипания затрагивает в недостаточной степени. Попытки теоретически определить протяженность зоны прилипания предпринимаются авторами работ [75, 76], однако применение упрощенных подходов, в частности, на основе осадки [75] не позволило получить достоверные результаты. Экспериментальные данные, относящиеся к объяснению природы прилипания, в литературе встречаются не часто и те, что имеются, по мнению автора [73, с. 23] являются недостаточно убедительными: «Что касается опытных данных о наличии зоны прилипания, то они пока в достаточной степени противоречивы».

Многие исследователи, отмечая многофакторность процесса прокатки, часто объяснения картины прилипания сводят к одному параметру – толщине полосы (высоте очага деформации), используя количественные значения фактора формы l_d/h_{cp} . При этом в недостаточной степени принимается во внимание тот факт, что l_d/h_{cp} является укрупненным фактором и он включает в себя в неявной форме угол захвата, диаметр валков, обжатие и высоту раската. Кроме того, в еще более неявной форме предполагаются и различные условия трения для высокого и низкого очага деформации. Так, например, высокий очаг деформации, имеющий место при прокатке на обжимном стане, сопровождается большими углами захвата и высоким коэффициентом трения, а также предельным (или близким к предельному) соотношением сил тянущих и препятствующих процессу. В условиях полной противоположности происходит прокатка полосы с низким очагом деформации. Указанные сопутствующие признаки высокого или низкого очага деформации, не находят своего отражения в объяснениях явления прилипания. Авторы [77] по поводу участия фактора формы в оценке степени прилипания отмечают следующее: «...границы параметра l_d/h_{cp} , определяющие преобладания процесса скольжения или прилипания, размыты». Неравномерность деформации, которая часто упоминается в связи с прилипанием, имеет свою наглядную определенность лишь при прокатке в калибрах. Примени-

тельно к гладкой бочке это понятие теряет свою определенность поскольку процесс прокатки всегда сопровождается неравномерностью деформации, а общепринятого критерия неравномерности деформации не выработано. Поэтому объяснения явления прилипания с позиций неравномерности деформации не имеют под собой даже качественной основы.

Прилипание не всегда возможно установить экспериментальным путем, его достаточно отчетливое проявление можно ожидать лишь в ограниченных случаях, в других – при использовании специальных методов и средств исследований. Тем не менее, исследователи часто делают обобщающие выводы на основе частных случаев. Автор [78], изучая закономерности движения металла в очаге деформации при прокатке, применяет методы среза керновых отпечатков и координатной сетки, использует понятие «неравномерность продольных скоростей металла». Использует в целом оригинальную методику, включающую, например, возможность получить представление о мгновенном очаге деформации (используя сбрасыватель верхнего валка), но выявление прилипания, не является основной задачей, тем не менее, делается вывод о ее отсутствии [78, с. 280]: «Опытные данные автора, относящиеся к простой прокатке, не подтверждают существование зоны прилипания в очаге деформации, ни при наличии уширения, ни тем более при его отсутствии. Подсчеты показывают, что для развития прилипания при простой прокатке необходимая неравномерность продольных скоростей металла вблизи критического сечения должна быть во много раз больше, чем существующая в действительности, а в плоскости входа она достигает невероятных размеров». Автор ставит существование зоны прилипания в зависимости от неравномерности скоростей металла на контакте с валком, свои выводы он подкрепляет расчетами, основанными на условии постоянства секундных объемов. Авторы [79], используя скоростную киносъемку, провели целенаправленные исследования, направленные на выявление протяженности зон прилипания и скольжения. В результате было установлено наличие зоны прилипания при прокатке высоких полос; при $l_d/h_{cp} < 0,45$ имеет место зона прилипания по всей длине очага деформации, при увеличении l_d/h_{cp} протяженность зоны прилипания уменьшается.

Приведенные выше объяснения природы прилипания в достаточно ранний период времени можно признать объяснимыми, поскольку процесс прокатки, будучи построенным на трении, не имел глубокой теоретической базы в области пластического трения. Следует отметить, что и в целом трибологические знания в то время оставались еще недостаточно глубокими (термин «трибология» утвердился в 1961 году). Достаточно полной ясности в вопросах трибологии не достигнуто и в настоящее время, это отмечают специалисты в этой области знаний [80]: «До настоящего времени трение во многих его аспектах остается загадкой». В каче-

стве резюме к сказанному в части прилипания можно привести высказывание авторов [6]: «Среди исследователей, признающих зону прилипания в различных случаях прокатки, отсутствует единое мнение даже о качественном влиянии некоторых факторов на ее протяженность...».

Все различия во взглядах в части природы прилипания и опережения имеют более глубокие причины, нежели принято считать [81, 82]. Начинаются они с того, что в теории прокатки утвердилось объяснение силовой картины в очаге деформации, которые нуждаются в уточнениях [83]. Теория пластического трения при прокатке базируется на смежных областях знаний, но не всегда сведения из них принимаются во внимание, примером может быть сказанное ниже. При взаимном движении контрол коэффициент трения и силы не обладают достаточной определенностью, в этом случае в соответствии с принципами, изложенными в работе [84, с. 5]: «...кинетическое трение мы должны характеризовать работой, а не силой... если с течением времени сила трения изменяется, то нам необходимо от силы перейти к работе». Подход, основанный только на учете сил, автор считает ошибочным [84, с. 5]: «...принципиальная ошибка большинства исследователей заключалась в том, что измерялась только сила трения и не определялась работа». Сказанное в полной мере относится к процессу прокатки.

Схема сил при установившемся процессе, применяющаяся в теории прокатки, утвердилась достаточно давно (схема не приводится по причине своей известности). Следует отметить, что существовали и иные взгляды на природу сил при прокатке, предлагались другие схемы, авторами их были Кодрон, Кирхберг, Головин, Верещагин и другие. В схеме сил, принятой в теории прокатки, не отражен фактор прилипания и по этой причине в описаниях схем не встречаются пояснения, относящиеся к природе прилипания. Этому есть свое объяснение – схема сил создавалась при уже сформировавшихся на тот период представлениях о природе опережения, а тема прилипания была еще в начальной стадии своего обсуждения и носила дискуссионный характер. Более существенным является тот факт, что утвердившаяся в теории прокатки схема сил является физически недостаточно корректной с позиций механики, в частности, по причине того, что силам трения присваивается роль активных сил, в то время как они являются реактивными по определению [85].

Уравнение равновесия, которое приводится в литературе по теории прокатки, и которым пользуются для решения силовых и кинематических задач, представляет собой статически неопределимую систему. Для ее решения используют различные допущения: принимают тот или иной закон распределения давлений по дуге контакта (линейный, трапецеидальный, параболический или другие), для установления силовой картины трения используют законы Амонтона, Зибеля, или эмпирические зависимости. Уравнение равновесия не отражает динамических процессов, происходящих в

очаге деформации, в частности тех, о которых говорится в работе [86]. Все известные схемы отражают статически неопределимую задачу. Неопределенность задаче придает, прежде всего, присутствие реакции шероховатой связи. Процесс прокатки происходит в условиях пластического трения, а это предполагает физически другой контакт, отличный от того, который изучается в механике, где рассматривается взаимодействие абсолютно твердых тел. В механике для деформируемого тела используют принцип отвердевания (равновесие изменяемого (деформируемого) тела, находящегося под действием данной системы сил не нарушится, если тело считать отвердевшим), но он применяется при малых деформациях, преимущественно упругих, для больших пластических деформаций он неприменим. Неопределенность задаче придает и кинематика течения металла в очаге деформации. Наличие зон скольжения и прилипания и, соответственно, присутствие трения скольжения и покоя в пределах одной поверхности контакта не позволяет использовать единый закон (условие) трения.

В теории прокатки не достигнуто единство мнений по вопросам контактного взаимодействия не только с позиций трения, но и с точки зрения принципов общей механики. В результате утвердилось мнение, что из всех внешних сил, приложенных к металлу в очаге деформации, только силы в зоне отставания являются втягивающими (сталкивающими); именно они обеспечивают захват полосы и непрерывное продвижение ее между валками. Считается, что металл проталкивается входной частью валков через выходную, вторая препятствует продвижению металла. А.Ф. Головин [87, с. 9] делает оригинальное дополнение, говоря: «...прокатные валки представляют собой совершенно своеобразный самоподающий пресс, который одновременно производит сжатие и растяжение прокатываемой полосы...». И. М. Павлов [88, с. 122] не поддерживает мнение А.Ф. Головина относительно возможности растяжения полосы в очаге деформации: «Вместо теории трехосного сжатия, как следовало бы, он применил к процессу прокатки тщательно разработанную им теорию параллелепипедной деформации при высотном сжатии и продольном растяжении». Это притом, что в работах А. Я. Хейна [89] уже были показаны случаи прокатки полос при наличии значительных внутриочаговых растяжений, в некоторых случаях, приводящих к разрыву полосы в валках. Позже теоретические положения, подтверждающие возможность продольных растяжений в очаге деформации, получили достаточно широкое признание [90, с. 440]: «...теперь признана возможность наличия растягивающих напряжений в очаге деформации при прокатке».

В связи со всем вышесказанным обратимся к физической стороне процесса прокатки. Во мнениях авторов, которые придерживаются принципа проталкивания металла через выходную часть очага деформации (аналог прессования), заложены противоречия. Одно из них заключается в том, что для обеспечения проталкивания во входной части

очага деформации должна быть обеспечена прочная фрикционная связь металла с валком (по типу фрикциона) – на контакте должно быть трение покоя. Это означает близкие значения скоростей металла и валков. Практика, как известно, подобное опровергает – во входной части очага деформации имеет место скольжение (практически во всем диапазоне возможных вытяжек, за исключением случаев прокатки особо толстых полос, при которых вся контактная поверхность стремится быть зоной прилипания. Если предположить, что во входной части очага деформации существует фрикционная связь, то опережение при прокатке должно быть намного выше того, какое имеет место в действительности. В этом заключается второе противоречие и оно вытекает из первого – металл, будучи во фрикционной связи во входной части валков, будет стремиться уйти в вытяжку с ускорением, которое придаст металлу скорость на выходе, намного превышающую скорость валков. Превышение скорости должно быть тем больше, чем выше коэффициент вытяжки, соответственно, опережение должно быть намного выше того, какое имеет место на практике.

Механическая система «валки–металл» представляет собой прямой аналог фрикционной передачи. Систему «валки–металл», вообще говоря, можно рассматривать и как аналог реечного зацепления, но такая аналогия более корректна по отношению к валкам, где применяется наварка или насечка. Это особый случай прокатки и по своим трибологическим признакам он находится за порогом внешнего трения, поскольку по утверждению специалистов в этой области [91, с. 6]: «Внешнее трение невозможно для очень шероховатых тел, так как вместо трения происходит зацепление (речный эффект)». Вращательное движение валков преобразуется в поступательное движение металла путем фрикционной связи валков с металлом. Фрикционная передача в механике реализуется на основе трения покоя, проскальзывание в ней возможно (например, в лобовой фрикционной передаче) но оно не имеет преобладающего характера или сплошного скольжения. Трение скольжения не способно обеспечить стабильное взаимное перемещение тел, находящихся во фрикционном зацеплении, соответственно, и зона отставания при прокатке, где происходит интенсивное скольжение (пробуксовка), не может выполнить роль фрикционного механизма.

Аналогию с самоподающим прессом [87] нельзя признать вполне удачной, поскольку несопоставимы скоростные режимы прессования и прокатки. Если перенести кинематику проталкивания (прессования) на прокатку, то скорости прокатки будут полностью отличны от тех, которые имеют место в действительности. Поскольку на контакте металла с валком для обеспечения фрикционной связи должны действовать статические силы трения, то это должно означать близкие значения скоростей металла \vec{v}_0 и валков $\vec{v}_в$, в свою очередь, это должно привести к тому, что скорость металла на выходе

будет значительно выше скорости валков. Практика, как известно, подобное опровергает.

Объяснения участия зоны скольжения в процессе прокатки относительно ее фрикционной роли можно дополнить. Взаимное скольжение тел не обеспечивает устойчивую связь в фрикционном механизме, но имеется (или, по меньшей мере, может быть) совокупность и диапазон изменения параметров, при которых названная связь является достаточно устойчивой, или носит переходной характер от состояния покоя к скольжению и наоборот. Область малых скольжений (смещений) в очаге деформации при этом способна создать достаточно заметные тянущие функции. Диапазон и эффективность тянущих возможностей области малых смещений при прокатке являются неисследованными. Не выработаны также критерии кинематической оценки зон, являющихся переходными от состояния покоя к скольжению и наоборот. В трибологии в первом случае (переход от состояния покоя к скольжению) характеризуется коэффициентом сцепления [85], во втором – динамическим коэффициентом трения [91]. Основным параметром, влияющим на ход подобных переходных процессов, является скорость взаимного скольжения тел. То есть, говоря об отсутствии фрикционной связи в зоне отставания при прокатке (связи по типу фрикциона), следует иметь в виду переходной участок, где скорости металла и валков сближаются. Представление о наличии подобных переходных зон [63], сформировалось под влиянием установленной достаточно давно зависимости скорости прокатки на коэффициент трения. (Причины влияния скорости прокатки на условия трения относятся к числу нераскрытых теоретических вопросов). Протяженность переходной зоны (и, соответственно, ее фрикционная роль) не может быть определена достаточно объективно, поскольку отсутствуют количественные критерии оценки, характеризующие переходное состояние от покоя к скольжению. В трибологии существует термин «предварительное смещение», который характеризует подобное состояние, но, будучи качественным критерием, означающим относительное микросмещение двух твердых тел в пределах перехода от состояния покоя к относительному движению, он не может быть применен для стоящей задачи. Названный переход в условиях пластического трения носит качественно другой характер по причине насыщенности контакта и объемного течения металла. Исследователи, изучавшие вопросы прилипания при прокатке, не задавались целью выработать подобный критерий и по этой причине оценка тянущей способности переходной зоны и, соответственно, ее протяженность является неполной. Зону прилипания в целом можно характеризовать ее как область с ограниченным (упругим) смещением металла относительно валков. В качестве величины ограниченного смещения в первом приближении можно принимать перемещение, поддающееся измерению.

Зона прилипания участвует в формировании тянущих возможностей валков, ее протяженность

характеризует собой резерв втягивающих сил. Опережение формируется под влиянием тянущей зоны, оно является в определенной мере вторичным фактором. Уменьшение резерва втягивающих сил означает уменьшение протяженности зоны прилипания, при этом одновременно происходят и изменения в части формирования опережения. Сопутствующим явлением становится и скольжение в зоне отставания. Участок отставания примыкает к зоне прилипания, он занимает входную часть очага деформации и имеет известные кинематические признаки, но не имеет того физического назначения, которое ему отводилось – вталкивать металл вглубь очага деформации. Опережение и отставание являются сопутствующими процессами, они зависят от ряда технологических факторов, в том числе и от характера области прилипания. Вопрос формирования опережения требует дополнительного изучения, об этом, в частности, говорится в работах [3, 4].

Расположение зоны прилипания вблизи плоскости выхода из очага деформации обусловлено также энергетическим принципом минимума работы. Если сравнивать процессы обработки металлов давлением, где преобладает продольная вытяжка, с позиций энергозатрат, то, как известно, наиболее энергоемким является прессование, наименее энергозатратным – волочение. Если оценивать процесс прокатки с позиций вышеприведенных положений, то проталкивание металла входной частью валков является процессом, близким к прессованию («самопрессование» по выражению А.Ф. Головина), то есть наиболее энергозатратным, а это противоречит энергетическим принципам механики. В соответствии с приведенными доводами, зона прилипания, обеспечивая процесс прокатки, выполняет тянущие функции. В этом случае в очаге деформации создается разноименная схема напряженного состояния, процесс приближается к волочению, или «самоволочению», если следовать терминологии А.Ф. Головина.

В объяснениях природы прилипания дискуссионным продолжает оставаться вопрос о том, может ли зона прилипания занимать всю контактную поверхность. Впервые мысль о том, что вся контактная поверхность может быть зоной прилипания, высказал Н.А. Соболевский [60]. Многие исследователи продолжительное время ставили под сомнение наличие зоны прилипания или возможность ее протяженности в пределах всей площади контакта. Автор [60] говорил о сплошном прилипании как о частном случае, но его утверждение часто воспринималось, как если бы речь шла о преобладающем явлении. Возникали возражения, поскольку исследователи визуально наблюдали обратное явление – интенсивное скольжение на значительной части контактной поверхности. Не находя подходящих объяснений, некоторые исследователи отвергали саму возможность существования сплошного прилипания на контакте. Другими исследователями было установлено, что зона прилипания может занимать значительную (большую) часть контактной

поверхности, в публикациях последнего периода приводятся данные о параметрах очага деформации, при которых наблюдается подобное явление [71, 72], однако общие закономерности, которые приводят к появлению сплошного прилипания при прокатке, не установлены. Признавая возможность полного прилипания исследователи при этом достаточно обоснованно считают, что в этом случае металл должен полностью идти в уширение [26, 42]. Подобное обоснование применимо для частного случая, но в более общем виде, строго говоря, оно противоречит принципу процесса прокатки, поскольку одним из его признаков является наличие вытяжки.

Еще одна из причин, порождающих спорные положения в теории прокатки, заключается в том, что часто предпринимаются попытки установить факт полного прилипания (или его отсутствия) с позиций общей картины процесса прокатки, или напротив – обобщающие выводы делаются на основе частных случаев. Так, например, исследователи, признающие возможность прилипания, делают выводы на основе экспериментальных исследований, которые проводились при прокатке толстых полос. Напротив, исследователи, наблюдавшие интенсивное скольжение на значительной части контактной поверхности при прокатке тонких полос, делали свои выводы об отсутствии возможности существования достаточно большой протяженности зоны прилипания. Исследователи, говоря о прилипании, не всегда принимают во внимание кинематические особенности, сопровождающие названное явление, не учитывают специфические признаки очага деформации, на контактной поверхности которого наблюдается (или может происходить) прилипание, в частности, особенности формоизменения и поперечного течения металла. Сплошное прилипание на всей контактной поверхности, являясь частным случаем общей картины прилипания при прокатке, помимо сохранения общих признаков и природы его возникновения, требует включения дополнительных условий [92].

Устоявшиеся объяснения природы и механизма опережения не в состоянии объяснить некоторые проявления при прокатке: отрицательное опережение [53-56, 93], прилипание, взаимосвязь с уширением [1-3,], рост опережения при повышенных обжатиях [2]. Последнюю взаимосвязь автор [2, с. 44] характеризует как аномальный рост опережения при повышенных обжатиях, который не может быть объяснен с позиций современной теории прокатки. Автор отмечает, что полученные результаты являются полной противоположностью тем, которые получаются на основе зависимости между углами захвата α , нейтрального угла γ и трения β , предложенной И.М. Павловым. Отмеченный факт является еще одним подтверждением многофакторности явления опережения. В работе [2] не приводятся все параметры прокатки, при которых выполнялся эксперимент, но, судя по величине относительных обжатий (70...80 %), можно предполагать, что речь идет об области прокатки тонких полос. Подобные

результаты могут иметь место и при прокатке толстых полос. Тафель, отмечая особенность формирования опережения при прокатке полос большой толщины и повышенную величину опережения при этом, объясняет неравномерностью деформации и возрастающей ролью зоны прилипания. Последняя «...не только охватывает почти всю контактную поверхность, но и распространяется вглубь полосы, вследствие чего приконтактный слой металла становится как бы продолжением тела вала. Поскольку растет фиктивный радиус вала, это способствует увеличению опережения» [7]. Тафель, объясняя механизм формирования опережения при прокатке толстых полос, подводит к мысли о прилипании (приконтактный слой металла становится как бы продолжением тела вала), о его объемном характере и взаимосвязи с опережением. Мнение о том, что опережение имеет объемный характер, впервые высказал Бласс [79]. Объяснение давалось на основе возникновения в очаге деформации объемных зон, которые позже стали называть зонами (конусами) затрудненной деформации. А.И. Целиков приводит следующие объяснения [94, с. 118]: «Процесс опережения металла развивается не только в геометрический (контактной) зоне деформации, как это излагает И.М. Павлов, но он также происходит во внеконтактной зоне, в которой происходит выравнивание скоростей путем ускорения (за счет растяжения одних частей полосы) и замедления (вследствие сжатия других)».

Все сказанное выше убеждает в том, что опережение имеет объемный характер, оно создается в пределах очага деформации, окончательно формируется в окрестностях плоскости выхода. Металл на заключительной стадии обжатия в очаге деформации (вблизи плоскости выхода) освобождается от действия внутриочагового натяжения, увлекаемый валками устремляется вперед, обжимаясь, получает на заключительной стадии остаточную вытяжку. Величина коэффициента вытяжки на указанном этапе $\lambda_{ост}$ в значительной степени количественно определяет величину опережения. Со значительной долей вероятности можно предполагать, что $\lambda_{ост} - 1 \approx S$, подобное утверждение было высказано автором работы [95].

Спорным положением становится безупречность метода определения опережения на основе керновых отпечатков при всей его простоте и доступности. По мнению исследователей, полное выравнивание скоростей металла в поперечно-вертикальном сечении происходит за плоскостью осей рабочих валков. На участке полного выравнивания скоростей происходит и формирование длины между керновыми отпечатками на раскате, а это вносит дополнительные погрешности в метод. При использовании методом керновых отпечатков нельзя полностью исключить возможное участие валков совместно с металлом в формировании «кернового» опережения, поскольку есть основания предположить, что расстояние между керновыми отпечатками частично формируется за счет упругих дефор-

маций валка и металла. Вызывает сомнение и правомочность использования кернового метода в исследованиях отрицательного опережения. В работе [4, с. 25] автор отмечает: «Неправомочностью использования кернового метода объясняется, с нашей точки зрения, и появление сплошного отставания («отрицательного опережения») в очаге деформации...». Недостаточная достоверность кернового метода и ограниченная возможность его применения в производственных условиях вызывает необходимость поиска новых подходов к определению опережения [96]. Вопрос о механизме образования отрицательного опережения продолжает оставаться малоизученным и он заслуживает отдельного рассмотрения.

Ограниченные рамки настоящей работы не позволяют привести в достаточном объеме и другие спорные положения и противоречия, существующие в современной теории прокатки. Некоторые противоречия и спорные положения являются следствием тех, которые приведены выше. В частности, спорными продолжают оставаться некоторые подходы к решению задач несимметричной прокатки и определению энергосиловых параметров. Некоторые из предложений по минимизации спорных положений освещены в работе [97].

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ спорных положений и противоречий в теории прокатки. Анализ свидетельствует о том, что по ряду основных положений не выработаны общие подходы к решению задач пластического течения металла; во взглядах на природу

пластического трения при прокатке не выработаны общие подходы; не сформулированы физически обоснованные объяснения кинематических проявлений, сопровождающих процесс прокатки – прилипания и опережения.

Расширены представления о физическом смысле явления прилипания, его назначении и роли при прокатке. Исходя из принципа минимума работы, кинематических признаков и принципов трибологии установлено, что область прилипания представляет собой участок контактной поверхности, который обеспечивает фрикционную связь валка с металлом, а тем самым и работу деформации. Ранее считалось, что прилипание является сопутствующим фактором и проявляется оно вследствие действия сил на контакте; функции объекта, который обеспечивает процесс прокатки, придавались зоне отставания. Установлено, что зона отставания (зона ускорения металла), как область, где происходит интенсивное скольжение, в силу отсутствия фрикционной связи в системе валок-металл не может обеспечить процесс прокатки. Процесс прокатки, будучи построенным на трении, производится за счет трения покоя и названные функции обеспечивает зона прилипания. Зона прилипания расположена вблизи плоскости выхода из очага деформации, кинематическим подтверждением такого расположения являются близкие значения скоростей металла и валка. Расположение зоны прилипания вблизи плоскости выхода из очага деформации обусловлено также энергетическим принципом минимума работы. Расширены представления о механизме образования опережения и отставания, их взаимосвязи с прилипанием.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Долженков Ф. Е. О некоторых противоречиях современной теории прокатки / Ф. Е. Долженков // Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – Т. 5. – С. 121–124.
2. Долженков Ф. Е. Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки) / Ф. Е. Долженков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 5. – С. 41–44.
3. Долженков Ф. Е. Нерешенные вопросы современной теории прокатки / Ф. Е. Долженков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 9. – С. 52–56.
4. Зильберг Ю. В. О некоторых противоречиях и допущениях теории прокатки / Ю. В. Зильберг // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 11. – С. 24–26.
5. Мазур В. Л. Нерешенные задачи теории и технологии прокатки / В. Л. Мазур // Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – Т. 5. – С. 33–36.
6. Теория обработки металлов давлением. (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И. Я. Тарновский, А. Н. Поздеев, О. А. Ганаго [и др.]; под редакцией И. Я. Тарновского. – М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 672 с.
7. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – Изд. второе, перераб. и доп. – М. : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2001. – 280 с. – ISBN 5-89594-067-6.
8. Леванов А. Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин [и др.]. – М. : Металлургия, 1976. – 416 с.
9. Леванов А. Н. Состояние и перспективы исследований контактного трения в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов // Сталь. – 2000. – № 9. – С. 31–35. – ISSN 0038–920X.
10. Хайкин Б. Е. Модель трения в условиях обработки металлов давлением / Б. Е. Хайкин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 9. – С. 57–61.
11. Зильберг Ю. В. Закон и модели пластического трения / Ю. В. Зильберг // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 22–24.
12. Хайкин Б. Е. Рецензия на статью Ю. В. Зильберга «Закон и модели пластического трения» / Б. Е. Хайкин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 24–25.
13. Зильберг Ю. В. Ответы автора Ю. В. Зильберга на замечания рецензента Б. Е. Хайкина / Ю. В. Зильберг // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – 25 с.

14. Хайкин Б. Е. Операционалистический подход к проблеме трения в условиях обработки металлов давлением / Б. Е. Хайкин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 11. – С. 26–27.
15. Василев Я. Д. Уточнение модели напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 5. – С. 19–23.
16. Василев Я. Д. Модель напряжений трения при тонколистовой прокатке / Я. Д. Василев, А. В. Деметиенко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 1. – С. 29–33.
17. Зильберг Ю. В. Замечания по дискуссии о пластическом трении / Ю. В. Зильберг // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 9. – С. 26–29.
18. Воронцов А. Л. К вопросу о контактном трении, кривых упрочнения и эффекте Баушингера (В порядке обсуждения) / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2011. – № 3. – С. 39–47.
19. Воронцов А. Л. К вопросу о контактном трении, кривых упрочнения и эффекте Баушингера (В порядке обсуждения) (продолжение) / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2011. – № 4. – С. 38–44.
20. Василев Я. Д. Модель напряжений трения при прокате / Я. Д. Василев // Производство проката. – 1998. – № 6. – С. 2–8.
21. Василев Я. Д. Разработка новой модели напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 5. – С. 28–32.
22. Огинский И. К. Пластическое трение при прокатке / И. К. Огинский // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування : збірник наукових праць. – 2011. – № 62. – С. 150–154. – ISSN 0372-6053.
23. Экспериментально-аналитический метод определения напряжений трения в процессах обработки металлов давлением / В. М. Грешнов, А. В. Боткин, В. Ю. Шолом [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 1. – С. 26–29.
24. Зильберг Ю. В. Некоторые спорные проблемы контактного трения при осадке и прокатке / Ю. В. Зильберг // Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства». – М. : Металлургия, 1975. – С. 40–45.
25. Зарощинский М. Л. Перемещение металла в очаге деформации при прокатке / М. Л. Зарощинский // Сталь. – 1950. – № 8. – С. 715–719.
26. Голубев Т. М. Определение перемещений в прокатываемом металле / Т. М. Голубев // Сталь. – 1952. – № 2. – С. 138–141.
27. Головин А. Ф. Опережение, максимальный угол захвата и коэффициент трения / А. Ф. Головин // Сталь. – 1947. – № 1. – С. 320–327.
28. Бояршинов М. И. Опережение при прокатке толстых полос / М. И. Бояршинов, В. В. Мельцер // Обработка металлов давлением : сб. научн. тр. / Днепропетровский металлургический институт. – М. : Металлургия, 1956. – № 4. – С. 70–85.
29. Родзевич-Белевич А. Ф. К теории опережения при прокатке / А. Ф. Родзевич-Белевич // ЖРМО. – 1912. – № 1–41. – С. 632–653.
30. Целиков А. И. О направлении сил, действующих при прокатке на валок и его подшипники / А. И. Целиков // Вестник металлопромышленности. – 1935. – № 3. – С. 3–17.
31. Челышев Н. А. Опережение и уширение при прокатке на гладкой бочке / Н. А. Челышев, А. Р. Фастыковский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 6. – С. 50–53.
32. Выдрин В. Н. Исследование опережения при прокатке толстых полос / В. Н. Выдрин, В. Я. Тумаркин, Л. М. Агеев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 2. – С. 75–78.
33. Бахтинов Ю. Б. Опережение и отставание металла при прокатке / Ю. Б. Бахтинов // Сталь. – 1988. – № 8. – С. 58–61.
34. Онищенко И. И. Опережение и нейтральное сечение при прокатке с натяжением и уширением / И. И. Онищенко // Металлургия и коксохимия. ОМД. – 1970. – № 23. – С. 8–13.
35. Серегин С. А. О механизме образования опережения при прокатке / С. А. Серегин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 4. – С. 22–24.
36. Потапкин В. Ф. Опережение при прокатке толстых полос / В. Ф. Потапкин, И. А. Бобух // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1973. – № 11. – С. 122–124.
37. Файнберг Ю. М. Опережение и натяжение при прокатке с переменным обжатием / Ю. М. Файнберг // Сталь. – 1948. – № 9. – С. 798–802.
38. Санько Н. М. Зона прилипания и роль ее в процессе прокатки / Н. М. Санько // Обработка металлов давлением / Ред. А. П. Чемерев. – М. : Металлургиздат, 1970. – № LIV. – С. 75–89.
39. Пирязев Д. И. Исследование протяженности зон скольжения и прилипания по длине очага деформации при прокатке / Д. И. Пирязев, Ю. И. Бать, А. М. Джетымова // Труды Вниметмаш : сборник статей / Ред. А. А. Королева и В. Г. Дроздов. – 1970. – № 26. – С. 280–284.
40. Напряженное состояние в очаге деформации при прокатке высокопрочной толстолистовой стали / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова, А. А. Завражных [и др.] // Металлы. – 2007. – № 3. – С. 33–39.
41. Моделирование контактных напряжений и усилий горячей прокатки тонких широких полос с учетом зоны прилипания и упругих участков очага деформации / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова, П. А. Тарасов [и др.] // Металлы. – 2007. – № 2. – С. 26–35.
42. Спиридонов Н. П. Определение коэффициента трения при прокатке на гладкой бочке при помощи диаграммы радиального давления / Н. П. Спиридонов // Обработка металлов давлением : сборник статей / Ред. Н. П. Громов. – М. : Металлургиздат, 1952. – № 9. – С. 17–41.
43. Суворов И. К. Скольжение и прилипание при прокатке / И. К. Суворов // Сталь. – 1952. – № 3. – С. 242–247.
44. Клименко П. Л. Определение коэффициента трения по опытному опережению / П. Л. Клименко // Теория и практика металлургии. – 1998. – № 6. – С. 14–16.
45. Выдрин В. Н. Об определении критического угла при прокатке / В. Н. Выдрин, В. Я. Тумаркин // Металлы. – 1976. – № 5. – С. 124–126.
46. Челышев Н. А. Длина зон на контактной поверхности при прокатке / Н. А. Челышев, А. Р. Фастыковский, А. Н. Челышев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 6. – С. 58–60.
47. Потапкин В. Ф. К расчету моментов и опережения при симметричной прокатке тонких полос / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, В. П. Орел // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 9. – С. 151–152.

48. Бахтинов Б. П. Некоторые вопросы теории прокатки / Б. П. Бахтинов // *Сталь*. – 1946. – № 4–5. – С. 281–285.
49. Чельшев Н. А. О методе определения коэффициента трения по опережению при прокатке / Н. А. Чельшев, А. Н. Чельшев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1986. – № 4. – С. 65–68.
50. Грудев А. П. Об определении коэффициента трения при прокатке по опережению / А. П. Грудев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1992. – № 3. – С. 34–37.
51. Фастыковский А. Р. Изучение влияния переднего подпора на протяженность зон скольжения и прилипания в очаге деформации при прокатке / А. Р. Фастыковский, В. Н. Перетятко // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 2. – С. 15–17.
52. Николаев В. А. К определению коэффициента трения по опережению / В. А. Николаев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1992. – № 5. – С. 35–38.
53. Максименко О. П. Устойчивость процесса прокатки с отрицательным опережением / О. П. Максименко, С. С. Землянова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – № 8–9. – С. 174–176.
54. Максименко О. П. Исследование контактных напряжений при однозонном скольжении металла в валках / О. П. Максименко, В. М. Самохвал, О. Е. Лейко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 4. – С. 52–55.
55. Максименко О. П. Исследование предельных условий захвата при прокатке высоких полос / О. П. Максименко, С. С. Землянова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – № 5. – С. 32–34.
56. Потапкин В. Ф. Касательные контактные напряжения при холодной прокатке с нулевым и отрицательным опережением / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, И. А. Морозов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1986. – № 2. – С. 155–156.
57. Моделирование напряженного состояния полосы при холодной прокатке в очаге деформации с двумя нейтральными сечениями / Э. А. Гарбер, Д. Л. Шалаевский, И. А. Кожевникова [и др.] // *Металлы*. – 2007. – № 4. – С. 41–53.
58. Методика и алгоритмы энергосилового расчета процесса холодной прокатки с учетом числа нейтральных сечений в очаге деформации / Э. А. Гарбер, Д. Л. Шалаевский, И. А. Кожевникова [и др.] // *Металлы*. – 2008. – № 8. – С. 53–66.
59. Зарощинский М. Л. К вопросу о перемещении металла в очаге деформации при прокатке / М. Л. Зарощинский // *Обработка металлов давлением : сборник статей / Ред. Н. П. Громов*. – М. : Металлургияиздат, 1952. – № 9. – С. 5–16.
60. Соболевский Н. А. Основные явления процесса прокатки / Н. А. Соболевский // *Советская металлургия*. – 1933. – № 8–9. – С. 423–436.
61. Крейндин Н. Н. Расчет обжатий при прокатке цветных металлов / Н. И. Крейндин. – Изд. второе, перераб. и доп. – М. : Металлургияиздат, 1963. – 407 с.
62. Павлов И. М. О теории жестких концов и других теоретических вопросах прокатки / И. М. Павлов // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 447–451.
63. Целиков А. И. Основные положения современной теории продольной прокатки / А. И. Целиков // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 1959. № 11. – С. 3–29.
64. Павлов И. М. Анализ процесса прокатки при неравномерном распределении давления и сил трения / И. М. Павлов // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 11–30.
65. Галлай Я. С. О развитии некоторых вопросов теории прокатки / Я. С. Галлай // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 452–453.
66. Целиков А. И. Анализ характера деформации при прокатке / А. И. Целиков // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 461–463.
67. Белосевич В. К. О работах Н. А. Соболевского и А. И. Целикова / В. К. Белосевич // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 483–484.
68. Перлин И. Л. Замечания по некоторым вопросам теории прокатки / И. Л. Перлин // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 581–583.
69. Аркулис Г. Э. К вопросу о зонах затрудненной деформации / Г. Э. Аркулис // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 615–616.
70. Макеев Д. И. О прокатке толстых листов / Д. И. Макеев // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Металлургияиздат, 1962. – С. 660–661.
71. Гарбер Э. А. Моделирование контактных напряжений и усилий горячей прокатки тонких широких полос с учетом зоны прилипания и упругих участков очага деформации / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова, П. А. Тарасов [и др.] // *Металлы*. – 2007. – № 2. – С. 26–36.
72. Гарбер Э. А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова, П. А. Тарасов // *Производство проката*. – 2007. – № 4. – С. 7–15.
73. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов / В. Н. Выдрин. – Свердловск : Металлургияиздат, 1960. – 255 с.
74. Клименко В. М. Кинематика и динамика процессов прокатки / В. М. Клименко, А. М. Онищенко. – М. : Металлургия, 1984. – 232 с.
75. Динник А. А. К вопросу о границах зоны прилипания / А. А. Динник, Л. Б. Черногоров // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. / Днепропетровский металлургический институт*. – М. : Металлургия, 1967. – № 52 – С. 239–246.
76. Чекмарев А. П. Определение длины зоны прилипания и среднего значения коэффициента трения / А. П. Чекмарев, А. А. Динник // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. / Днепропетровский металлургический институт*. – М. : Металлургия, 1971. – № 56 – С. 169.
77. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М. : Металлургия, 1970. – 456 с.
78. Потоскуев М. Н. Закономерности движения металла в очаге деформации при прокатке / М. Н. Потоскуев // *Производство и обработка стали и сплавов : сборник статей*. – Металлургияиздат, 1958. – С. 245–281.
79. Котель Э. Основы прокатки / Э. Котель. – М.–Л.–Свердловск : Гос. науч.-техн. изд-во по черной металлургии и цветным металлам, 1933. – 82 с.
80. Гаркунов Д. Н. Триботехника // Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1989. – 327 с.

81. Огинский И. К. Прилипание при прокатке, его происхождение и физическое назначение / И. К. Огинский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 5. – С. 46–51.
82. Огинский И. К. О механизме опережения при прокатке / И. К. Огинский // *Теория и практика металлургии*. – 2010. – № 5–6. – С. 113–117.
83. Огинский И. К. Силовая картина в очаге деформации при установившемся процессе прокатки / И. К. Огинский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 1. – С. 37–40.
84. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела [в 4 т]. Материалы по физике внешнего трения, износа, и внутреннего трения твердых тел / В. Д. Кузнецов. – Томск: Красное знамя, 1947. – Т. 4. – 542 с.
85. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения : ГОСТ 27674-88. – [Дата введения 01. 01. 89]. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 20 с.
86. Максименко О. П. Равновесие металла в валках с учетом внутренних сил / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Обработка металлов давлением : сб. научн. тр.* – Краматорск : Донбасская государственная машиностроительная академия, 2010. – № 2 (23). – С. 163–167. – ISSN 2076-2115.
87. Головин А. Ф. Прокатка. Часть 2. Теория продольной прокатки / А. Ф. Головин. – М. : Metallurgizdat, 1934. – 236 с.
88. Павлов И. М. Теория прокатки / И. М. Павлов. – М. : Metallurgizdat, 1950. – 610 с.
89. Хейн А. Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки / А. Я. Хейн. – М. : Metallurgizdat, 1941. – 247 с.
90. Перлин И. Л. О докладах К. Н. Шевченко, И. Я. Тарновского / И. Л. Перлин // *Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*. – М. : Metallurgizdat, 1962. – С. 440–441.
91. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / [В. Д. Зозуля, Е. Л. Шведков, Д. Я. Рвинский, Э. Д. Браун]. – К. : Наукова думка, 1990. – 260 с.
92. Огинский И. К. Условия, при которых вся контактная поверхность может быть зоной прилипания / И. К. Огинский // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 1. – С. 14–16.
93. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки по эпюрам контактных напряжений / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 2. – С. 110–114.
94. Целиков А. И. Об опережении прокатываемого металла в очаге деформации / А. И. Целиков // *Обработка цветных металлов и сплавов : сборник статей*. – Metallurgizdat, 1953. – № 8 – С. 114–119.
95. Тарновский И. Я. Формоизменение при пластической обработке металлов / И. Я. Тарновский. – М. : Metallurgizdat, 1954. – 534 с.
96. Ольдзиевский В. К. Методы экспериментального определения опережения, относительного обжатия и межклетевой деформации на непрерывных станах / В. К. Ольдзиевский, В. К. Звонарев // *Обработка металлов давлением : сб. научн. тр. / Днепропетровский металлургический институт*. – М. : Металлургия, 1967. – № 52. – С. 308–313.
97. Огинский И. К. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров / Огинский И. К., Данченко В. Н., Самсоненко А. А., Бояркин В. В. – Днепропетровск : Пороги, 2011. – 355 с.