



РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771.23

Мазур В. Л.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

Благодаря усилиям на протяжении многих десятков лет нескольких поколений ученых и производственников основы теории и технологии прокатки разработаны и доведены до широкой аудитории пользователей. Тем не менее развитие общества, его производительных сил обуславливает непрерывную эволюцию промышленности, в том числе металлургии, составной частью которой является прокатное производство, требующее постоянной модернизации, эффективно выполнять которую невозможно без надлежащего укрепления научного фундамента в этой области.

В Украине значительный вклад в развитие теории и технологии тонколистовой прокатки внесли ученые научной школы, созданной в Днепропетровске академиком Александром Петровичем Чекмаревым. В 1970 году по его инициативе на базе лаборатории листовой прокатки, организованной в Институте черной металлургии НАН Украины ещё в 1965 году, был сформирован отдел производства тонкого листа (ныне отдел проблем прокатки листа), которым в разные периоды руководили доктора наук В. И. Мелешко, В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько. Отдел выполнял исследования, составившие научно-техническое обеспечение производства массовых видов широкополосного проката: автолиста, жести, сталей новых марок и назначений, обеспечивающих требуемые технологические свойства листового проката и далее продукции машиностроения. География работ отдела охватывала все без исключения листопрокатные комплексы металлургических комбинатов Украины, России, Казахстана. Достоинство проводимых в этот период научно-исследовательских работ и их результатов состояло, прежде всего, в том, что разработки выполнялись комплексно, одновременно на всех операциях и агрегатах технологического цикла, включая станы горячей и холодной прокатки, дрессировки, травильные линии, печи для термической обработки листовой стали, установки для порезки металла и др.

Среди наиболее важных научных достижений, надолго опередивших результаты исследований зарубежных учёных, необходимо назвать разработки теорий формирования заданной микрогеометрии полосы [1], прокатки в режиме жидкостного и полужидкостного трения, образования напряжённого состояния рулонов, расчета и прогнозирования структуры и свойств продукции в потоке широкополосного стана [2–4], совмещённого регулирования профиля и формы полос. Результаты этих исследований были положены в основу монографий [1–11 и др.], многие из которых стали настольными книгами специалистов металлургии и машиностроения.

Впервые в отечественной практике на основе исследований и разработанных технологических рекомендаций было освоено массовое производство материалов – листовой стали марки 08Ю высших категорий вытяжки и групп отделки поверхности, тонкой и тончайшей (полунагартованной) жести, гаммы экономнолегированных полосовых сталей для автомобилестроения, низколегированной полосовой стали горячекатаной травленой дрессированной листовой стали взамен отдельных профилей холоднокатаной и др. [2, 3, 8, 10]. Результаты теоретических исследований явились научным фундаментом новых технических и технологических решений, внедренных в производственную практику [11].

Наряду с названными выше руководителями отдела производства тонкого листа Института черной металлургии существенный вклад в создание идеологии развития листопрокатного производства внесли его ведущие учёные, доктора и кандидаты наук А. А. Чернявский, А. П. Качайлов, С. Д. Адамский, В. Г. Иванченко, А. В. Ноговицын, С. А. Воробей, Г. В. Левченко, Л. А. Шевченко и многие другие специалисты.

Огромное влияние на формирование взглядов, идей в области теории и технологии листовой прокатки оказали научные семинары, проводимые в Днепропетровском металлургическом институте академиком А. П. Чекмаревым и заведующим кафедрой обработки металлов давлением А. П. Грудевым, а также фундаментальные результаты ученых ВНИИМетмаша, Московского института стали и сплавов, Центрального научно-исследовательского института черной металлургии Минчермета СССР, Липецкого и Донецкого политехнических институтов, Донецкого научно-исследовательского института черной металлургии, Уральской школы прокатчиков и многих других научных коллективов, проектных и конструкторских организаций. Неоценим вклад технических специалистов «Запорожстали», Магнитогорского, Карагандинского, Мариупольского им. Ильича, Череповецкого, Новолипецкого металлургических комбинатов в проведение научных экспериментов в промышленных условиях и внедрение результатов исследований в производственную практику.

В современных условиях оба украинских металлургических комбината тонколистового профиля – «Запорожсталь» и Мариупольский им. Ильича вошли в стадию глубокой реконструкции производства. При этом ученые-листопрокатчики Украины имеют необходимые подготовку и потенциал для научно-технического обеспечения и освоения новых технологий и проектирования оборудования, решения всех оперативных и перспективных вопросов. Среди научно-технических задач, требующих дальнейшей экспериментальной и теоретической разработок, назовем следующие.

В листопрокатном производстве на нынешнем этапе его развития актуальными являются задачи повышения качества и конкурентоспособности, расширения номенклатуры продукции, освоения её новых видов, экономия металла, топлива, воды, тепловой и электрической энергии, уменьшения отходов производства. Каждая из этих задач представляет собой комплекс проблем и нерешенных научно-технических вопросов.

Создание новых и совершенствование действующих технологий в условиях современных листопрокатных комплексов не может ограничиваться использованием полуэмпирических подходов, построенных преимущественно на базе производственного опыта, а должно опираться на надежный теоретический фундамент в области обработки металлов давлением. Именно поэтому теория листовой прокатки развивается путем всестороннего исследования поведения металла в очаге деформации при прокатке, выявления закономерностей, связывающих показатели качества листов и полос с режимами их обжаты и последующей термической обработки. Используемые при этом методы механики сплошных сред и металлографического анализа позволяют выполнять количественные оценки происходящих в металле превращений непосредственно в процессе прокатки.

К новому классу теоретических и прикладных задач листопрокатного производства относятся задачи прогнозирования структуры и свойств стали; предупреждения дефектов сплошности листового металла; оценки надежности технологических операций прокатки и последующей отделочной обработки; построения математических моделей, учитывающих вероятностную природу производственных процессов в металлургии; достаточно строгого моделирования изучаемых явлений с учетом многофакторности, сложной взаимозависимости, многостадийности производственных переделов. Разработанные в Институте черной металлургии НАН Украины (Ноговицыным А. В. с сотрудниками) математические модели позволяют прогнозировать структуру и механические свойства металла в процессе горячей прокатки на станах различного типа достаточно достоверно [11]. Однако возможности совершенствования этих моделей и алгоритмов их реализации далеко не исчерпаны.

Особое внимание должно быть уделено построению математических моделей и алгоритмов нового поколения, компьютерным системам расчета и оптимизации процессов горячей и холодной прокатки, работающих в реальном масштабе времени и пригодных для использования в системах автоматического управления прокатными станами. Примером таких решений могут служить разработки, выполненные и внедренные в производство под руководством Приходько И. Ю. и Чернова П. П. на Новолипецком металлургическом комбинате.

Сегодня все крупные научные коллективы разработали и используют математические модели и алгоритмы расчета параметров процесса проката, которые дают результаты достаточно близкие к наблюдаемым в промышленной практике. При этом используемые модели различаются между собой набором допущений и выбором эмпирических констант. Например, если проанализировать формулы для расчета коэффициента трения в очаге деформации при прокатке, применяемые в математических моделях, разработанных разными коллективами, то легко убедиться, что они дают величины и зависимости, не совпадающие не только количественно, но и качественно. Это обусловлено тем, что получаемые обратным пересчетом по экспериментально зарегистрированным параметрам процесса прокатки на промышленных станах выражения для определения коэффициента трения как бы вбирают в себя результат допущений, принятых при построении математических моделей. В этой связи актуальной научной задачей является повышение корректности моделей процесса прокатки путем учета ими максимального количества влияющих факторов, в том числе перевода ранее принятых допущений в компоненты математических зависимостей, основанных на новейших результатах исследований, представляющих собой признанные достижения в науке.

На нынешнем этапе развития теории прокатки, следует четко понимать, что физические константы, описывающие свойства прокатываемого металла (сопротивление деформации, показатели упрочнения) и условия внешнего трения (толщину смазочной пленки в зоне контакта поверхностей валков и полосы, коэффициент трения), а также температурные, энергосиловые, кинематические параметры процесса прокатки представляют собой случайные величины и, следовательно, необходимо рассматривать их распределения, оперировать характеристиками этих распределений (математическими ожиданиями, средними квадратическими отклонениями и др.), а не пользоваться только средними значениями, как было в прошлом.

Вследствие нестабильности химического состава, структуры и свойств металла, точности размеров исходного подката, непостоянства условий трения в очаге деформации и других параметров процессы горячей и холодной прокатки, необходимо рассматривать в вероятностной постановке как в теоретическом, так и в технологическом аспектах. Результаты исследований, выполненных в этом направлении с привлечением метода Монте-Карло, обобщены в наших работах [9, 11]. Однако приведенные в этих и некоторых других публикациях материалы следует оценивать как начало развития существенно нового направления в теории прокатки. Можно ожидать, что современный уровень науки, возможности компьютерного анализа и непрерывной статистической обработки обширных массивов информации о параметрах процесса прокатки непосредственно на промышленных станах в режиме реального времени, позволит существенно повысить надежность и достоверность прогнозирования и оценок качества готовой продукции.

Говоря о стабильности процесса холодной прокатки полос, необходимо затронуть также тему возникновения резонансных колебаний в рабочих клетях и перегрузок в главных приводных линиях непрерывных станов. Возникновение вибраций при холодной прокатке тонких полос на непрерывных станах нарушает технологический процесс, ухудшает качество прокатываемого металла. Несмотря на определенные успехи, достигнутые в решении частных задач предотвращения или хотя бы уменьшения вибраций на прокатных станах Новолипецкого, Череповецкого, Карагандинского, «Запорожсталь» металлургических комбинатов, эта тема требует дальнейших обобщающих решений ввиду ее актуальности и крайней важности, прежде всего в связи с повышением скоростей холодной прокатки тонких полос.

Процесс прокатки в реальных промышленных условиях нередко проходит с элементами геометрической, скоростной, температурной и другой асимметрии даже тогда, когда номинально он считается симметричным. Такое утверждение базируется, прежде всего, на результатах вероятностной оценки распределений величин входных и выходных параметров процесса прокатки, условно называемого симметричным [9, 11]. Кроме того, достаточно часто, помимо случайно возникающих отклонений параметров прокатки от заданных значений, преднамеренно создается определенная несимметрия этого процесса с целью достижения желательного влияния на его энергосиловые условия или показатели качества прокатанного металла [12].

В связи со сказанным, вопросы теории и технологии процесса асимметричной прокатки в большей или меньшей степени являлись предметом исследований многих известных ученых, специализирующихся в области обработки металлов давлением. Сослаться на все работы этого направления в настоящей статье не представляется возможным из-за ее ограниченного объема. Поэтому отметим лишь то, что детальная классификация различных видов асимметрии процесса прокатки предложена в работах М. Я. Бровмана. Результаты всесторонних собственных исследований и многочисленные экспериментальные данные, приведенные в технической литературе, наиболее полно обобщены и систематизированы в статьях и монографиях В. А. Николаева и В. Г. Сеницына.

На данное время достаточно глубоко теоретически и экспериментально исследован процесс прокатки при геометрической, скоростной, фрикционной (при различных коэффициентах трения на контактных поверхностях в очаге деформации со стороны верхнего и нижнего валков), а также асимметрии за счет неодинаковых механических свойств прокатываемого металла, в частности, из-за различной температуры по толщине полос. Основные результаты выполненных работ, предложения по использованию эффектов асимметрии для совершенствования процесса прокатки и улучшения качества металлопродукции, а также направления дальнейшего развития теории процесса асимметричной прокатки на базе современных возможностей метода линий скольжения, численного анализа и вычислительной техники показаны в работах [11–12]. Главный вывод заключается в том, что асимметрию (несимметрию) процесса прокатки в современных условиях надо рассматривать не столько как неизбежное и подлежащее устранению следствие несовершенств технологического процесса, сколько как средство воздействия на параметры, а также на качество готовой металлопродукции. Так, за счет рассогласования скоростей валков, можно уменьшить усилие прокатки, регулировать толщину прокатываемых листов, управлять их изгибом. Потенциальные возможности асимметрии процесса прокатки еще до конца не изучены и требуют дальнейшего исследования, поскольку описания процесса асимметричной прокатки с помощью приближенных теорий по ряду причин оказываются несовершенными.

Долгое время в металлургии требуемого внимания не уделялось вопросам снижения затрат энергии при прокатке. Сегодня же приоритет в промышленности состоит в существенном уменьшении энергоемкости производства металла. Реализация энергосберегающего направления развития металлургии рассматривается как неременное условие достижения энергонезависимости Украины. Тенденции на мировом рынке энергоносителей свидетельствуют о том, что цены на газ, нефть, уголь будут непрерывно возрастать. Скорее всего, добыча их в мире в перспективе не увеличится. Будет повышаться стоимость электроэнергии. Поэтому острота проблемы тепло- и энергосбережения в металлургии и ее прокатном производстве будет возрастать.

Энергия при прокатке стали на широкополосных станах горячей прокатки (ШСГП) расходуется, во-первых, на нагрев слэбов в методических печах и, во-вторых, на деформацию металла. Затраты на нагрев слэбов составляют 55–60 % всех энергозатрат на ШСГП. Заметим, что на мелкосортных станах для нагрева заготовок перед прокаткой тратится 70–90 % энергии. Суммарный расход энергии зависит от компоновки черновых и чистовых групп клетей конкретного стана и может быть минимальным при выборе оптимальных температур нагрева слэбов, заготовок, режимов прокатки.

Энергия в производстве листов и полос существенно экономится, при прямой подаче слябов на ШСГП, минуя нагревательные печи. Производственный опыт свидетельствует, что при организации горячего посада непрерывнолитых слябов в нагревательные печи при температуре 300 °С расход топлива на их нагрев сокращается примерно на 10–12 %. Если температура слябов при их посадке в печь составляет 900 °С и более, то экономится до 60 % топлива. Считается, что снижение температуры нагрева слябов перед прокаткой на ~10 °С позволяет уменьшить расход топлива на 2 %.

Возможности снижения температуры нагрева слябов в печах или осуществления «транзитной» прокатки возрастают при реализации мероприятий по уменьшению потерь тепла раскатами при их движении в линии ШСГП. Среди таких мероприятий можно назвать, во-первых, оснащение ШСГП перемоточным устройством («койлбоксом») на промежуточном рольганге. Во-вторых, применение теплосохраниющих устройств, экранирующих поверхность раскатов от взаимодействия с окружающей средой. Можно ожидать, что процесс совершенствования теплосохраниющих установок и систем будет продолжаться и дальше по пути повышения их эффективности в части теплосбережения и надежности работы в условиях интенсивной эксплуатации. Наука здесь располагает широким полем для поиска.

При реконструкции и модернизации ШСГП, действующих, в частности, на комбинатах «Запорожсталь» и Мариупольском им. Ильича, основное внимание уделяется поиску таких решений, (прежде всего, компоновки и модернизации клетей черновых групп станов), которые обеспечат, с одной стороны, минимальный расход энергии на нагрев и прокатку полос, а с другой – необходимые для получения требуемых структуры и свойств горячекатаной стали температур конца прокатки и смотки полос.

В связи с обострением проблемы энергосбережения в последние годы ведется интенсивный поиск новых схем и компоновок литейно-прокатных модулей для производства листового и сортового проката на строящихся, действующих и реконструируемых объектах. Причем, если ранее одним из основных направлений развития металлургии было создание мини-металлургических заводов мощностью 1,0–1,5 млн тонн проката в год, то сегодня уже проектируются и вводятся в эксплуатацию микро-металлургические заводы производительностью 100–300 тыс. т/год и даже 30–50 тыс. т/год. Очевидно, что технологические режимы производства стали и проката на таких объектах имеют специфические особенности и требуют соответствующего научного сопровождения.

Одним из ключевых вопросов в проблеме обеспечения высокого качества листопрокатной продукции является предупреждение возникновения дефектов металла. Применительно к технологии производства проката по схеме слиток-сляб-рулон основные причины образования дефектов и меры их предупреждения в большинстве изучены [1, 4, 6 и др.]. Однако повсеместный переход на непрерывную разливку слябов, в том числе тонкослябовую технологию производства листовой стали, ставит новые, ранее не изученные задачи в этой области, которые, безусловно, требуют оперативного решения на базе результатов глубоких теоретических и экспериментальных исследований.

Процессы горячей и холодной прокатки листовой стали предусматривают применение технологической смазки. Толщина слоя смазки в очаге деформации увеличивается с ростом скорости прокатки. Высокоскоростные станы холодной прокатки могут работать в режиме смазки, близком к жидкостному (гидродинамическому) [7]. В таких условиях поведение процесса прокатки со смазкой принципиально отличается от процесса прокатки без смазки, в режиме сухого или граничного трения. Поэтому в фундамент современной теории листовой прокатки должны быть заложены результаты аналитических и экспериментальных исследований течения смазки в очаге деформации. Это позволит правильно объяснить все многообразие явлений, наблюдаемых при прокатке с технологическими смазками, выявить основные закономерности и свойства этого процесса.

Исследования процесса прокатки с применением технологической смазки наиболее активно проводились в семидесятых-восьмидесятых годах прошлого столетия А. П. Грудевым и его учениками. Полученные научные результаты имеют фундаментальный характер

и позволили успешно решить прикладные технологические задачи на многих металлургических комбинатах. Однако теория прокатки в режиме полужидкостного трения, например, получившая определенный импульс в монографии [7], как и ряд других проблемных вопросов в области теории прокатки с применением технологической смазки, требует дальнейшего развития.

В заключение следует подчеркнуть, что тема дальнейшего развития теории и технологии листовой прокатки не ограничена названными задачами, поскольку научный поиск, в принципе, не имеет каких-либо границ.

ВЫВОДЫ

Перспективными направлениями последующих разработок являются теория процесса прокатки в режиме полужидкостного трения, вероятностные имитационные модели процесса прокатки, позволяющие осуществлять постановку и решение задач без каких-либо допущений, упрощений, а также математические модели формирования структуры и механических свойств деформируемого металла в процессе его прокатки, работающие в режиме реального времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Отделка поверхности листа* / В. И. Мелешко, А. П. Чекмарев, В. Л. Мазур, А. П. Качайлов. – М. : Металлургия, 1975. – 272 с.
2. *Беняковский М. А. Производство автомобильного листа* / М. А. Беняковский, В. Л. Мазур, В. И. Мелешко. – М. : Металлургия, 1979. – 256 с.
3. *Повышение качества листового проката* / Мазур В. Л., Качайлов А. П., Иванченко В. Г. [и др.]. – К. : Техніка, 1979. – 143 с.
4. *Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью* / В. Л. Мазур. – Киев : Техніка, 1982. – 166 с.
5. *Мазур В. Л. Прокатка металла со сварными соединениями* / В. Л. Мазур, В. И. Мелешко, Д. П. Галкин. – М. : Металлургия, 1985. – 112 с.
6. *Мазур В. Л. Предупреждение дефектов листового проката* / В. Л. Мазур, А. И. Добронравов, П. П. Чернов. – К. : Техніка, 1986. – 142 с.
7. *Мазур В. Л. Теория прокатки (гидродинамические эффекты смазки)* / В. Л. Мазур, В. И. Тимошенко. – М. : Металлургия, 1989. – 192 с.
8. *Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство : учебник* / Сафьян М. М., Мазур В. Л., Сафьян А. М., Молчанов А. И. – К. : Вища шк., 1988. – 351 с.
9. *Надежность технологического процесса производства листового проката* / В. Л. Мазур, С. А. Воробей, Д. Л. Романовский [и др.]. – К. : Техніка, 1992. – 170 с.
10. *Управління якістю тонколистового прокату* / В. Л. Мазур, О. М. Саф'ян, І. Ю. Приходько, О. І. Яценко. – К. : Техніка, 1997. – 384 с.
11. *Мазур В. Л. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения)* / В. Л. Мазур, А. В. Ноговицын. – Днепропетровск : РВА «Дніпро – VAL», 2010. – 500 с.
12. *Теория и технология несимметричной прокатки* / В. А. Николаев, В. Л. Мазур, А. К. Голубченко, Е. В. Бинкеви. – М. : Агентство «Информарт», 1996. – 262 с.

Мазур В. Л. – д-р техн. наук, проф. ФТИМС НАН Украины, чл.-кор. НАН Украины.

ФТИМС НАН Украины – Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев.

НАН Украины – Национальная академия наук Украины, г. Киев.

E-mail: vlm@tsum.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 11.10.2012 г.