

УДК 621.771.23

В.Л. Мазур, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Украины, гл. науч. сотр., e-mail: prof.vlm@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Теория и технология прокатки: нерешенные задачи и аспекты развития

Рассмотрены актуальные задачи в области теории и технологии горячей и холодной прокатки полос. Показано, что на нынешнем этапе эволюции прокатного производства дальнейшего углубленного изучения требуют математические модели, описывающие формирование структуры и механических свойств стали при горячей прокатке, модели и алгоритмы оптимизации процесса прокатки, работающие в масштабе реального времени, вероятностные модели процессов горячей и холодной прокатки, теория прокатки в режиме полужидкостного трения. Приведены ссылки на работы, посвященные раскрытию механизма формирования микрорельефа поверхности полос при холодной прокатке, а также анализу закономерностей влияния состояния поверхности валков, степени и скорости деформации, механических свойств металла, других параметров процессов прокатки и дрессировки. Отмечено, что разработанные технологические решения обеспечивают получение в производственных условиях заданной стандартами шероховатости поверхности тонколистовой стали. Рассмотрено развитие теории и практики применения технологической смазки при холодной прокатке полос. Показаны позитивные эффекты, достигаемые с применением технологической смазки, и ее влияние на формирование микрорельефа прокатываемого металла. Даны рекомендации по использованию опубликованных теоретических решений в промышленной практике. Обращено внимание на практику применения технологической смазки при горячей прокатке стальных полос на широкополосных станах. Подчеркнута эффективность такой технологии. Предложены направления теоретических исследований в этой сфере науки, а также развития способов и систем подачи смазочных материалов на прокатные валки и в очаг деформации. Принципиальное значение для дальнейшего развития теории и технологии тонколистовой прокатки имеют новые методики и алгоритмы оценки устойчивости рулонов холоднокатаных полос, разработанные на основании нового подхода к расчету их напряженно-деформированного состояния. Эффективность рекомендованных решений по предупреждению дефектов рулонов холоднокатаной тонколистовой стали подтверждена промышленной практикой. Предложены направления развития научных основ процесса тонколистовой прокатки и способы решения ряда актуальных задач. В технологии основные усилия должны быть направлены на решение вопросов энергосбережения, повышения эффективности производства и улучшения качества листовой продукции.

Ключевые слова: сталь, прокатка, теория, технология, производство, энергосбережение, металлопродукция, эффективность, качество.

Усилиями нескольких поколений ученых и производственников разработаны основы теории и технологии прокатки металлов и сплавов. Тем не менее, эволюция промышленности, в том числе металлургии, составной частью которой является прокатное производство, требует постоянной модернизации оборудования и технологии. Их совершенствование невозможно без надлежащего укрепления и развития научного фундамента в этой сфере знаний. Возникает необходимость совершенствования научных подходов и методов, используемых в расчетах основных параметров процесса прокатки. Новые, ранее неведомые возможности высокоточного оперативного анализа сложнейших научных аспектов теории и технологии прокатки открыло стремительное развитие вычислительной техники.

Применительно к листопрокатному производству в нынешнее время научно-исследовательские рабо-

ты в направлении повышения эффективности производства и улучшения качества металлопродукции должны выполняться 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. Именно с этих позиций следует подходить к определению наиболее актуальных научно-технических задач в рассматриваемой области и поиску путей их решения.

Среди наиболее важных научных достижений украинских ученых в листопрокатном производстве в последние десятилетия необходимо назвать разработки теории и технологии формирования заданной микрогеометрии тонколистовой стали, теории прокатки в режиме жидкостного и полужидкостного трения, математических моделей формирования напря-

женного состояния рулонов прокатываемых полос, прогнозирования структуры и механических свойств горячекатаной стали в потоке широкополосного стана, совмещенного регулирования профиля и формы полос. Результаты этих исследований были положены в основу ряда монографий [1–12 и др.], многие из которых обрели статус классических в литературе по металлургии и машиностроению. На основе материалов исследований и разработанных технологических рекомендаций было освоено массовое производство высококачественной продукции – листовой стали высших категорий вытяжки и групп отделки поверхности, тонкой и тончайшей жести, горячекатаных полос для автомобилестроения из экономно легированных сталей, горячекатаной травленой дрессированной листовой стали взамен холоднокатаной и др. [2, 3, 8, 10]. Названные и многие другие технические и технологические решения внедрены в производственную практику.

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

Затрагивая тему влияния состояния поверхности листового металла на его функциональные свойства, необходимо отметить следующее.

В монографии [1, с. 68–111] показано влияние шероховатости поверхности тонколистовой стали на ее механические свойства, штампуемость, пригодность к нанесению металлических покрытий и покраске. Однако с момента издания этой книги прошло много времени. Технология производства тонких листов, полос, жести шагнула далеко вперед. Расширилось производство листопрокатной продукции новых видов, в частности электролитически оцинкованного металла, полос с лакокрасочными покрытиями, тончайшей жести и других. Нанесение покрытий потребовало внесения корректив в технологию на передлах холодной прокатки, отжига и дрессировки полос. Возникли новые задачи, связанные с эффектами микрорельефа поверхности металла [13]. В частности, потребители ужесточили требования к шероховатости поверхности оцинкованного металла. Эти требования должны обеспечиваться технологическими режимами прокатки и отделки тонколистовой стали. Для определения и реализации в промышленной практике оптимальных режимов необходимы специальные исследования.

Другой пример. На современных линиях нанесения покрытий обработанные полосы сматывают в рулоны сравнительно большой массы. При этом, вследствие низкого коэффициента трения между витками полосы с нанесенным на ее поверхность покрытием, рулоны, находящиеся в горизонтальном положении, теряют устойчивость и проседают [14–15]. Из-за проскальзывания витков полосы в рулонах возникают

царапины и потертости на поверхности покрытия. Ухудшается качество продукции. Для предупреждения таких негативных последствий необходимо разработать специальные режимы регулирования натяжения сматываемых в рулоны полос, исключающие проседание рулонов.

Создание новых и совершенствование ныне применяемых 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 обжатий 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. Так, разработанные математические модели позволяют прогнозировать структуру и механические свойства металла в процессе горячей прокатки на станах различного типа достаточно достоверно [11, 16]. 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 украинскими учеными на ряде металлургических комбинатов [16 и др.].

Сегодня все крупные научные коллективы в своей работе широко применяют математические модели и алгоритмы расчета параметров процесса прокатки, которые дают результаты, достаточно близкие к наблюдаемому 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.

Следует констатировать, что среди десятков тысяч монографий, статей и других публикаций, посвященных вопросам теории и технологии прокатки, совсем слабо освещена проблема достоверной оценки надежности расчетных методов, моделей, формул, экспериментальных данных и принимаемых на их основе технологических решений. Надежность любого технологического процесса прокатки определяется не только возможностью обеспечения заданной производительности агрегатов, но и возможностью получения продукции с требуемыми уровнем и стабильностью показателей ее качества. В условиях рыночной экономики последнее условие часто становится главенствующим, поскольку от уровня и стабильности показателей качества проката решающим образом зависит его цена, возможности реализации, прибыльность производства.

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 работах авторов [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 ряда металлургических комбинатов [17–18 и др.], 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 сравнения распределений величин входных и выходных параметров процесса прокатки, условно называемого симметричным [12, 16]. Кроме того, достаточно часто, помимо случайно возникающих отклонений параметров прокатки от заданных значений, преднамеренно создается определенная несимметрия этого процесса с целью достижения желаемого влияния на его энергосиловые условия или показатели качества прокатанного металла.

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) несимметрии, а также асимметрии за счет неодинаковых механических свойств прокатываемого металла, в частности, из-за непостоянства 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 [12–16]. Главный вывод заключается в том, что асимметрию (несимметрию) 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 согласования 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 асимметрической прокатки с помощью приближенных теорий по ряду причин оказываются несовершенными.

Говоря о влиянии несимметрии процесса прокатки на свойства листовой стали, следует еще раз заострить внимание на установленной [1, с. 85–99] зависимости кристаллографической текстуры стальных отожженных полос от различия величин шероховатости поверхностей верхнего и нижнего рабочих валков при прокатке. В технической литературе пока нет сведений об использовании этого эффекта в промышленной практике. Но весьма вероятно, что при производстве листовой стали специального назначения, к текстуре которой предъявляются особые требования (например, обеспечение ориентировки кристаллов, близкой к беспорядочной по всей толщине листа), будут реализованы возможности несимметричного процесса прокатки, преднамеренно создаваемого приданием различной шероховатости верхнему и нижнему прокатным валкам [16]. Понятно, что для доведения этой идеи до промышленной технологии необходимы детальные исследования.

Процессы горячей и холодной прокатки листовой стали предусматривают применение технологической смазки [19]. 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, 20]. 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–восемидесятых годах прошлого столетия. 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 монографиях [7, 20], как и ряд других проблемных вопросов в области теории прокатки с применением технологической смазки требует дальнейшего развития.

В общем случае процесс листовой прокатки с технологической смазкой проходит в режиме смешанного (полужидкостного) трения, при котором величина результирующей силы трения определяется

относительной протяженностью участков граничного и жидкостного трения. Предельными состояниями режима полужидкостного трения при прокатке являются граничное трение и чисто жидкостное (гидродинамическое) трение. В реальных процессах листовой прокатки предельные условия трения встречаются редко. Тем не менее, теория процесса прокатки в режиме смешанного трения находится лишь на стадии начальных исследований и поэтому при выполнении прочностных и технологических расчетов, как правило, используют детально разработанные решения задач прокатки для одного из предельных случаев трения – сухого (граничного) с использованием закона трения Кулона-Амонтона, даже если применяется смазка и процесс прокатки проявляет «гидродинамические» свойства (с увеличением скорости прокатки коэффициент трения в очаге деформации уменьшается и др.).

В работах авторов [7, 19–20] предложена обобщенная математическая модель процесса прокатки при жидкостном трении, построенная с использованием закона трения Ньютона, согласно которому величина касательных напряжений в жидкости пропорциональна ее вязкости и градиенту скорости течения по толщине ее слоя в очаге деформации. На базе этой модели было проанализировано влияние различных факторов на параметры процесса прокатки в режиме трения, приближающегося к жидкостному. Важно, что в работах [7, 20] сформулированы принципы построения теории процесса прокатки в режиме полужидкостного трения, сделана постановка этой задачи и показаны пути ее решения. Однако до всеобъемлющего решения эта задача еще не доведена, хотя непреодолимых трудностей такого решения на современном этапе развития вычислительной техники не просматривается.

Основная идея предлагаемой для построения обобщенной модели процесса прокатки в полужидкостном режиме трения состоит в том, что влияние технологической смазки на трение в очаге деформации определяется двумя факторами – ограничением площади фактического контакта поверхностей валков и деформируемого металла и изменением величины касательных напряжений на участках истинного контакта. Причем, фактическая площадь контакта поверхностей валков и полосы определяется средней толщиной смазочной пленки в очаге деформации (количеством смазки, поступающей в зону контакта валков и деформируемого металла) и шероховатостью поверхности металла, сформированной в процессе его обжатия.

Строгая модель процесса прокатки в режиме полужидкостного трения позволит отразить дополнительные явления, которые непредсказуемы в рамках теории прокатки при гидродинамическом или граничном трении. В частности, рассматриваемая модель дает возможность выявить влияние на параметры процесса прокатки контактирования микронеровностей поверхностей валков и полосы.

Опыт использования различных технологических смазок при холодной прокатке тонколистовой стали

свидетельствует, что путем выбора оптимальных параметров эмульсий, включая характеристики и концентрацию базового масла в них, можно существенно улучшать качество прокатываемого металла. В частности, уменьшать загрязненность поверхности полос. Научный поиск в этом направлении не ограничен какими-либо обстоятельствами. В книге [20], например, показаны возможности улучшения плоскостности прокатываемых полос путем селективной подачи эмульсии на валки непрерывного стана холодной прокатки 2030 Новолипецкого металлургического комбината. Алгоритм управления эмульсионной системой этого стана заслуживает изучения и распространения в промышленной практике.

Важно подчеркнуть, что изложенная в книге [20] теория течения смазки в очаге деформации при холодной прокатке полос может быть эффективно использована при решении задачи предупреждения вибраций клетей непрерывного стана. Авторы работ [17–18] убедительно показали, что нестабильность течения смазки при прокатке в определенном диапазоне скоростей является одной из причин возбуждения вибраций стана. Исследования этого вопроса весьма перспективны, поскольку с проблемой вибрации отдельных клетей высокоскоростных непрерывных станов сталкиваются производители практически всех заводов. При возникновении вибраций операторы станов вынуждены снижать скорость прокатки, изменять режимы обжатий и натяжений и тем самым воздействовать на температуру прокатываемой полосы. Все названное приводит к нестабильности процесса прокатки. Снижение скорости прокатки и обусловленное этим уменьшение температуры в очагах деформации клетей непрерывного стана улучшает условия функционирования технологической смазки, устраняет разрушение смазочного слоя на границе контакта поверхностей валков и прокатываемого металла, устраняет возникшую нестабильность режима трения. Следовательно, решать проблему предупреждения вибраций непрерывных станов, возникающих в определенных диапазонах скоростей прокатки полос, необходимо, во-первых, путем подбора устойчивых к повышению температуры смазок, и, во-вторых, оптимизацией деформационного и температурно-скоростного режима прокатки полос. Именно поэтому при разработке современных математических моделей процесса прокатки с применением технологической смазки значимая роль должна отводиться выбору зависимости ее вязкости от давления и температуры. Относительно предотвращения вибраций клетей при холодной прокатке полос с высокой скоростью, то заслуживающие внимания рекомендации по этому вопросу даны в работах [17–18].

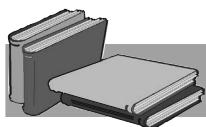
Долгое время в металлургии требуемого внимания не уделялось вопросам снижения затрат энергии при прокатке. Сегодня же приоритет в промышленности состоит в существенном уменьшении энергоемкости производства металла. В этой связи особого обсуждения заслуживают состояние и перспективы развития теории и технологии горячей прокатки широкополосной стали с применением смазки. Эф-

фективность этой технологии с позиций экономии энергии, затрачиваемой на прокатку, снижения износа валков, уменьшения нагрузок, действующих на оборудование прокатного стана, доказана как результатами тонких лабораторных экспериментов, так и производственной практикой [20–21 и др.]. Однако теория горячей прокатки полос и тем более труб, учитывающая все особенности процесса, еще далека до завершения из-за сложности относящихся к ней задач. Весьма трудоемкими являются экспериментальные исследования в этой сфере, но их результаты представляют несомненную ценность. Именно нехваткой имеющихся экспериментальных данных объясняется отсутствие единого мнения у проектантов и производителей относительно лучших способов и систем подачи смазочной среды на валки широкополосных станов горячей прокатки. Поэтому следует ожидать активных и всесторонних исследований процесса горячей прокатки с применением технологической смазки. При определении рационального расхода технологической смазки на станах горячей прокатки полос могут быть использованы рекомендации, приведенные в монографии [20] и статье [21].

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 миниметаллургических заводов мощностью 1,0–1,5 млн тонн проката в год, то сегодня нередко проектируются и вводятся в эксплуатацию микрометаллургические 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 [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 требуют решения на базе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

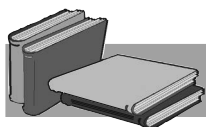
В заключение следует подчеркнуть, что тема дальнейшего развития теории и технологии листовой прокатки не ограничена названными задачами, поскольку научный поиск в принципе не имеет каких-либо границ. При этом заметим, что рассмотренные направления развития теории и технологии прокатки применимы не только к листопрокатному производству, но также и к другим процессам обработки металлов давлением (сортопрокатному, трубопрокатному производствам, волочению и др.).



ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешко В.И., Чекмарев А.П., Мазур В.Л., Качайлов А.П. Отделка поверхности листа. М.: Metallurgiya, 1975. 272 с.
2. Беньковский М.А., Мазур В.Л., Мелешко В.И. Производство автомобильного листа. М.: Metallurgiya, 1979. 256 с.
3. Мазур В.Л., Качайлов А.П., Иванченко В.Г. и др. Повышение качества листового проката. К.: Техніка, 1979. 143 с.
4. Мазур В.Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. Киев: Техніка, 1982. 166 с.
5. Мазур В.Л., Мелешко В.И., Галкин Д.П. и др. Прокатка металла со сварными соединениями. М.: Metallurgiya, 1985. 112 с.
6. Мазур В.Л., Добронравов А.И., Чернов П.П. Предупреждение дефектов листового проката. К.: Техніка, 1986. 142 с.
7. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Теория прокатки (гидродинамические эффекты смазки). М.: Metallurgiya, 1989. 192 с.
8. Пименов А.Ф., Сосковец О.Н., Трайно А.И., Мазур В.Л. и др. Холодная прокатка и отделка жести. М.: Metallurgiya, 1990. 208 с.
9. Мазур В.Л., Воробей С.А., Романовский Д.Л. и др. Надежность технологического процесса производства листового проката. К.: Техніка, 1992. 170 с.
10. Мазур В.Л., Сафьян А.М., Приходько И.Ю., Яценко А.И. Управление качеством тонколистового проката. К.: Техніка, 1997. 384 с.
11. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). Днепропетровск: РВА «Дніпро – VAL», 2010. 500 с.
12. Николаев В.А., Мазур В.Л., Голубченко А.К., Бинкевич Е.В. Теория и технология несимметричной прокатки. М.: Агентство «Инфомарт», 1996. 262 с.
13. Мазур В.Л. Качество тонколистовой холоднокатаной стали: обеспечение заданной шероховатости поверхности в производственных условиях. *Сталь*. 2018. № 1. С. 25–30.
14. Мазур В.Л., Тимошенко В.И., Приходько И.Ю. Потеря устойчивости и дефекты формы рулонов холоднокатаных полос (причины, способы предупреждения). *Сталь*. 2009. № 1. С. 24–32.
15. Мазур В.Л., Тимошенко В.И., Приходько И.Ю. Возможности управления напряженным состоянием рулонов воздействием на жесткость барабана моталки. *Сталь*. 2018. № 8. С. 19–26.
16. Mazur V.L., Nogovitsyn A.V. Theory and Technology of Sheet Rolling (Numerical Analysis and Applications): London-New York, CRC Press, 2019. 479 p. URL: <http://www.taylorandfrancis.com>; <http://www.crcpress.com>.
17. Приходько И.Ю., Крот П.В., Парсенюк Е.А. и др. Система контроля и методы снижения резонансных вибраций на непрерывных станах холодной прокатки полос. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. *Сборник научных трудов Института черной металлургии НАН Украины*. Вып. 12. Днепропетровск: Визон, 2006. С. 232–244.
18. Prikhod'ko I. Yu., Krot P. V., Solovyov K. V. et al. Vibration monitoring system and the new methods of chatter early diagnostics for tandem mill control. *Материалы лондонской конференции «Вибрации в прокатных станах»*. Лондон, 9 ноября 2006. С. 87–106.
19. Мазур В.Л. Эффекты технологической смазки при холодной прокатке и волочении труб. *Сталь*. 2018. № 10. С. 35–43.
20. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Теория и технология прокатки (гидродинамические эффекты смазки и микрорельеф поверхности). Киев.: ИД «АДЕФ Украина», 2018. 560 с.
21. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Горячая прокатка полос с применением технологической смазки. *Сталь*. 2018. № 4. С. 21–27.

Поступила 14.08.2019



REFERENCES

1. Meleshko, V.I., Chekmarev, A.P., Mazur, V.L., Kachaylov, A.P. (1975). Finishing the surface of the sheet. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
2. Benyakovsky, M.A., Mazur, V.L., Meleshko, V.I. (1979). Automotive sheet production. Moscow: Metallurgiya, 256 p. [in Russian].
3. Mazur, V.L., Kachaylov, A.P., Ivanchenko, V.G. et al. (1979). Improving the quality of sheet metal. Kyiv: Tekhnika, 143 p. [in Russian].
4. Mazur, V.L. (1982). High quality sheet production. Kyiv: Tekhnika, 166 p. [in Russian].
5. Mazur, V.L., Meleshko, V.I., Galkin, D.P. et al. (1985). Rolled metal with welded joints. Moscow: Metallurgiya, 112 p. [in Russian].
6. Mazur, V.L., Dobronravov, A.I., Chernov, P.P. (1986). Prevention of defects in sheet metal. Kyiv: Tekhnika, 142 p. [in Russian].
7. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. (1989). Theory of rolling (hydrodynamic effects of lubrication). Moscow: Metallurgiya, 192 p. [in Russian].
8. Pimenov, A.F., Soskovets, O.N., Traino, A.I., Mazur, V.L. et al. (1990). Cold rolling and finishing of tin. Moscow: Metallurgiya, 208 p. [in Russian].
9. Mazur, V.L., Vorobey, S.A., Romanovsky, D.L. et al. (1992). Reliability of the technological process for the production of sheet metal. Kyiv: Tekhnika, 170 p. [in Russian].

10. Mazur, V.L., Saf'yan, A.M., Prikhod'ko, I.Yu., Yatsenko, A.I. (1997). Quality management of sheet metal. Kyiv: Tekhnika, 384 p. [in Russian].
11. Mazur, V.L., Nogovitsyn, A.V. (2010). Theory and technology of sheet rolling (numerical analysis and technical applications). Dnepropetrovsk: PBA "Dnipro-VAL", 500 p. [in Russian].
12. Nikolayev, V.A., Mazur, V.L., Golubchenko, A.K., Binkevich, E.V. (1996). Theory and technology of asymmetric rolling. Moscow: Agency "Infomart", 262 p. [in Russian].
13. Mazur, V.L. (2018). Ensuring specified surface roughness in the production of thin cold steel sheet. *Steel*. Vol. 48, no. 1, pp. 49–54 [in Russian].
14. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I., Prikhod'ko, I.Yu. (2019). Stability loss and defects in coils cold-rolled strip. *Steel*. Vol. 49, no. 1, pp. 58–65 [in Russian].
15. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I., Prikhod'ko, I.Yu. (2018). Regulating the coil stress by adjusting the rigidity of the winding drum. *Steel*. Vol. 48, no. 8, pp. 528–535 [in Russian].
16. Mazur, V.L., Nogovitsyn, A.V. (2019). Theory and Technology of Sheet Rolling (Numerical Analysis and Applications): London-New York, CRC Press, 479 p. URL: <http://www.taylorandfrancis.com>; <http://www.crcpress.com> [in English].
17. Prikhod'ko, I.Yu., Krot, P.V., Parsenyuk, E.A. et al. (2006). Control system and methods for reducing resonant vibrations in continuous cold strip mills. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. *Collection of scientific papers of the Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Iss. 12. Dnepropetrovsk: Vision, pp. 232–244 [in Russian].
18. Prikhod'ko, I.Yu., Krot, P.V., Solovyov, K.V. et al. (2006). Vibration monitoring system and the new methods of chatter early diagnostics for tandem mill control. *Materials of the London conference "Vibrations in rolling mills"*. London. November 9, pp. 87–106 [in English].
19. Mazur, V.L. (2018). Lubricant in cold rolling and drawing of pipe. *Steel*. Vol. 48, no. 10, pp. 663–671 [in Russian].
20. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. (2018). Theory and technology of rolling (hydrodynamic effects of lubrication and surface microrelief). Kyiv: ID «ADEF Ukraine», 560 p. [in Russian].
21. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. (2018). Hot rolling of strip with lubricant: theoretical and practical aspects. *Steel*. Vol. 48, no. 4, pp. 245–251 [in Russian].

Received 14.08.2019

Анотація

В.Л. Мазур, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України, гол. наук. співр.,
e-mail: prof.vlm@ukr.net

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
Київ, Україна*

Теорія і технологія прокатки: невирішені задачі та аспекти розвитку

Розглянуто актуальні задачі у сфері теорії та технології гарячої та холодної прокатки штаб. Показано, що на нинішньому етапі еволюції прокатного виробництва подальшого поглибленого вивчення вимагають математичні моделі, які описують формування структури і механічних властивостей сталі під час гарячої прокатки, моделі і алгоритми оптимізації процесу прокатки, що працюють у масштабі реального часу, імовірнісні моделі процесів гарячої і холодної прокатки, теорія прокатки в режимі напіврідного тертя. Наведено посилання на роботи, присвячені вивченню механізму формування мікрорельєфу поверхні металу під час холодної прокатки, а також аналізу закономірностей впливу стану поверхні валків, ступеня і швидкості деформації, механічних властивостей металу, інших параметрів процесів прокатки і дресування. Відзначено, що розроблені технологічні рішення забезпечують отримання в виробничих умовах заданої стандартами шорсткості поверхні тонколистової сталі. Розглянуто розвиток теорії і практики застосування технологічного мастила під час холодної прокатки штаб. Показано позитивні ефекти, які досягаються застосуванням технологічного мастила, і його вплив на формування мікрорельєфу металу. Надано рекомендації щодо використання опублікованих теоретичних рішень у промисловій практиці. Звернуто увагу на практику застосування технологічного мастила під час гарячої прокатки сталевих штаб на широкоштабових станах. Підкреслено ефективність такої технології. Запропоновано напрями теоретичних досліджень у цій галузі науки, а також розвиток способів і систем подачі мастильних матеріалів на прокатні валки і в осередок деформації. Принципове значення для подальшого розвитку теорії і технології тонкоштабової прокатки мають нові методики і алгоритми оцінки стійкості рулонів холоднокатаних штаб, розроблені на підставі нового підходу до розрахунку їх напружено-деформованого стану. Ефективність рекомендованих рішень щодо попередження дефектів рулонів холоднокатаної тонкоштабової сталі підтверджена промисловою практикою. Запропоновано напрями розвитку наукових основ процесу тонкоштабової прокатки і способи вирішення низки актуальних задач. У технології основні зусилля повинні бути спрямовані на вирішення питань енергозбереження, підвищення ефективності виробництва і покращення якості металопродукції.

Ключові слова

Сталь, прокатка, теорія, технологія, виробництво, енергозбереження, металопродукція, ефективність, якість.

Summary

V.L. Mazur, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Chief Researcher,
e-mail: prof.vlm@ukr.net

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine*

Theory and rolling technology: unsolved problems and development aspects

Actual problems in the theory and technology of hot and cold strip rolling are considered. It is shown, that at the current stage of the evolution of rolling production, further in-depth study requires mathematical models, that describe the formation of the structure and mechanical properties of steel during hot rolling, models and optimization algorithms for the rolling process, that work in real time, probabilistic models of hot and cold rolling processes, rolling theory in semi-fluid friction mode. Links are given to works, devoted to the disclosure of the mechanism of formation of the microrelief of the surface of strips during cold rolling, as well as an analysis of the laws of the influence of the state of the surface of the rolls, the degree and speed of deformation, the mechanical properties of the metal, and other parameters of the rolling and tempering processes. It is noted, that the developed technological solutions provide in the production environment the surface roughness specified by the standards for sheet steel. The scientific foundations, the development of the theory and practice of the use of technological lubricants in cold strip rolling are considered. The positive effects achieved with the use of technological lubricants and its effect on the formation of the microrelief of the formed metal are shown. Recommendations are given on the use of published theoretical solutions in industrial practice. Attention is drawn to the theory and practice of the use of technological lubricants in the hot rolling of steel strips. The effectiveness of such technology is emphasized. The directions of theoretical research in this field of science, as well as the development of methods and systems for supplying lubricants to rolling rolls and to the deformation zone, are proposed. Of fundamental importance for the further development of the theory and technology of sheet rolling are new techniques and algorithms for assessing the stability of coils of cold-rolled strips, developed on the basis of a new approach to calculating their stress-strain state. The effectiveness of the recommended solutions for the prevention of defects in coils of cold rolled sheet steel is confirmed by industrial practice. The directions of development of the scientific foundations of the sheet rolling process and methods for solving a number of urgent problems are proposed. In technology, the main efforts should be aimed at solving energy conservation issues, improving production efficiency and improving the quality of sheet products.

Keywords

Steel, rolling, theory, technology, production, energy conservation, metal products, efficiency, quality.