

В.И.Большаков, В.В.Вернев

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ НАУЧНОЙ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ

Представлен анализ работ, в которых исследуется специфический (куполообразный) характер изменения момента сил технологического сопротивления (прокатки) в период захвата тонкой полосы валками. Показано, что комплекс научных результатов и практическая их проверка на листопрокатных станах, выполненные специалистами ИЧМ, позволили создать оригинальный способ описания переходных процессов и открыть новое направление, получившее развитие в современных исследованиях динамических и технологических нагрузок при прокатке листовой стали. Определены направления дальнейших исследований.

листопрокатные станы, линия привода, момент, жесткость клетки и полосы, динамическая нагрузка

При моделировании динамических процессов в прокатной клетке необходимо знать характер изменения силы и момента сопротивления, действующих на валки во время захвата ими полосы. Важность этого момента отмечал еще в 1953 г. С.Н. Кожевников [1]. В частности, он писал, что «основное влияние при изменении нагрузки на величину напряжений имеет баллистический эффект. Характер изменения моментов внешних сил в начальное время оказывает решающее влияние на величину напряжений, возникающих в упругих звеньях механизма».

При проведении теоретических исследований прокатных станов традиционно принимался скачкообразный, линейный либо параболический закон нагружения валков во время захвата полосы (в зависимости от типа стана). Это давало в большинстве случаев хорошее совпадение параметров расчетного и измеренного переходного процесса в линиях главного привода. Подобные законы применялись также при моделировании динамических нагрузок в листовых станах горячей и холодной прокатки, где согласно измерениям, выполненным в 1960 годы, коэффициент динамичности составлял 2,5...3,5.

Однако экспериментальные исследования нового стана кварто 2800 холодной поштучной прокатки карточек из нержавеющей стали, впервые выполненные в 1963 году ИЧМ под руководством В.И. Большакова, привели к ряду неожиданных результатов [2]. Один из них состоял в том, что коэффициент динамичности K на верхнем и нижнем шпинделях при захвате карточки валками достигал существенных значений – 5...9. Подобные значения K ранее на листовых станах не наблюдались.

Результаты целенаправленных исследований показали, что данное явление влиянием известных факторов (зазоров [3], параметров системы управления и электродвигателя [4], скорости прокатки [5]) не объясняется.

Тогда же С.Н. Кожевниковым и В.И. Большаковым было высказано казавшееся неожиданным предположение о том, что в период заполнения очага деформации металлом на валки действует момент технологического сопротивления (момент прокатки) специфической формы, отличающейся от ранее известных. При этом полагали, что в процессе захвата полосы валками момент сопротивления превышает момент в установившемся режиме прокатки. Причины возникновения увеличенного момента рассмотрены в работе В.И. Большакова [2]. Первые результаты моделирования динамических процессов в линии привода, выполненные под руководством С.Н. Кожевникова В.И. Большаковым [6], подтвердили это предположение. Можно считать, что это дало старт своеобразной научной гонке за развитием высказанной идеи, в которой в разное время участвовало около 30 исследователей.

Кроме превышения момента и существенных значений коэффициента динамичности на стане 2800 в результате натурных измерений в 1960–е годы обнаружен ряд новых явлений, не наблюдавшихся ранее в листопрокатных станах. К ним относятся: существенная неравномерность распределения динамической и статической нагрузки между шпинделями вплоть до полной разгрузки одного из них и передаче им отрицательного момента [3]; специфическое перемещение валков в вертикальном направлении за счет упругой деформации клетки [7]; зависимость максимального статического момента и динамической нагрузки от скорости захвата полосы [5,8]; зависимость динамических нагрузок от формы передней кромки полосы [9]. При таком обилии новых явлений на стане 2800 отмечались внезапные поломки универсальных шпинделей и рабочих валков. В связи с этим необходимо было установить причины указанных поломок, выяснить какую роль в этом играет специфика нагружения валков и её влияние на динамику переходных процессов, имеются ли подобные процессы на других прокатных станах.

После того, как были рассмотрены основные причины возникновения увеличенного момента сопротивления [2], стали интенсивно появляться публикации, в которых приводился вывод аналитических зависимостей для давления и момента сопротивления (прокатки). В работах [10,11] авторы выводят формулы для момента, полагая, что он состоит из составляющих, обусловленных работой формоизменения (обжатия), выборкой зазора в системе клетки и её упругой деформацией. Приводятся графики для момента с куполообразной составляющей, однако они имеют пока еще качественный характер. В работах [12,13] авторы приводят типичные осциллограммы момента сил упругости, полученные на стане 2800 при прокатке листа на малой скорости. Из-за медленного нагружения в линии привода практически не возникают динамические нагрузки: момент, передаваемый упругими связями, фактически описывает момент технологического сопротивления, действующий на валки. При этом момент во время захвата листа примерно в два раза больше, чем при установившемся

процессе прокатки. Анализируя механизм и причины формирования превышения момента на валках, автор [12] приходит к выводу, что это явление должно наблюдаться на других станах, в том числе на станах горячей прокатки полос.

В развитие исследований А.П. Чекмарев, М.М. Сафьян и Я.Д. Василёв получили выражение для момента прокатки на участке захвата полосы в зависимости от коэффициента, характеризующего степень заполнения очага деформации металлом ($0 \leq \eta \leq 1,0$). Исследуя функцию момента на экстремум, авторы получили выражение для коэффициента η_{\max} , при котором коэффициент $K_{\text{захв.}}$, представляющий отношение максимального момента деформации при захвате к моменту деформации в установившемся процессе, достигает максимального значения [14]. Далее отмечается, что коэффициент $K_{\text{захв.}}$ зависит от отношения «пружины» δ (упругой деформации) клетки к абсолютному обжатию Δh . Отмечается влияние жесткости клетки на $K_{\text{захв.}}$ при разных значениях параметра $P / \Delta h$, где P – сила прокатки. Ссылаясь на то, что максимальный динамический момент, передаваемый шпинделями, зависит от момента деформации (коэффициента $K_{\text{захв.}}$) при захвате полосы, авторы делают ошибочный вывод, что зависимость коэффициента динамичности $K_{\text{дин.}}$ от параметра $\delta / \Delta h$ будет аналогична зависимости $K_{\text{захв.}}$ от $\delta / \Delta h$. Авторы рассмотренной работы ограничиваются статическим решением задачи.

С.Н. Кожевников и В.И. Большаков впервые исследовали задачу в динамике [8]. Прежде всего выражение для силы прокатки P и момента на валках M в период заполнения очага деформации металлом они записали как функции угла поворота φ валков – $P(\varphi)$, $M(\varphi)$. Последние вошли в правую часть соответственно уравнения вертикального движения (деформации) одномассовой упругой системы клетки и двухмассовой электромеханической системы линии главного привода. Впервые отмечается, что сила $P(\varphi, x)$ является функцией угла поворота валков φ и одновременно функцией их перемещения x (деформации клетки). В результате получена математическая модель, отражающая динамическую взаимосвязь крутильной системы линии привода и поступательной системы клетки. Это позволило получить достаточно строгое решение задачи и определить давление металла на валки, момент сопротивления, момент сил упругости и ряд других параметров. А также определить условия, при которых наблюдаются максимальные значения статического момента при захвате и максимальные значения момента сил упругости и коэффициента динамичности. В работе [15] дан более подробный анализ функций $P(\varphi)$ и $M(\varphi)$.

В 1971 г. к исследованию функций P и M присоединяется группа авторов из ВНИИМетмаша, которая также считает, что увеличение момента является общей закономерностью процесса прокатки при захвате полосы [16]. Авторами получены аналитические выражения для давления и мо-

мента с учетом сплющивания валков в зависимости от расстояния передней кромки до оси, соединяющей центр валков. Определены выражения для максимального момента сопротивления и коэффициента превышения момента при захвате. В подтверждение своих выводов авторы приводят осциллограмму крутящих моментов на шпинделях, измеренных при небольшой скорости прокатки полос из алюминиевых сплавов на стане 3100. На ней отчетливо виден куполообразный характер изменения момента. На возможность превышения установившегося момента на валках в период заполнения очага деформации металлом в заготовочных станах указывает М.Я. Бровман [17]. Оценить верхнюю границу превышения момента предлагается по значению величины $A = 0,5 / n_{\sigma} \cdot \psi \cdot \sin \alpha$, где n_{σ} – коэффициент напряженного состояния при установившемся процессе, ψ – коэффициент положения равнодействующей, α – угол захвата. Так, при $\alpha = 20^{\circ}$ и $\psi = 0,5$ $A = 2,25$. Однако дальнейшего развития исследования в этом направлении не получили.

Результаты работы [8] показали, что достаточно полное исследование обнаруженного явления и его влияния на динамику может быть получено на модели, отражающей взаимосвязь электромеханической крутильной системы линии привода и поступательной системы клетки. Установлено, что деформация (жесткость) клетки (и скорость её упругой деформации) влияют на функцию момента и его куполообразную составляющую, а усилие прокатки зависит (как и M) от угла φ поворота валков, угловая скорость которых ввиду приложения нагрузки изменяется. С этого времени задача статического нагружения валков в период заполнения очага деформации металлом трансформируется в более актуальную задачу динамического взаимодействия крутильной и поступательной систем при специфическом законе нагружения валков.

Необходимость выяснить и уточнить роль конструктивных (в частности жесткости клетки) и технологических параметров (обжатие, скорость захвата, давление прокатки) приводит к продолжению исследований статического момента. В работе [18] В.И.Большаковым установлено, что основным критерием, характеризующим увеличение момента во время захвата листов, является соотношение жесткости полосы и жесткости клетки. В работе [19] показано влияние жесткости полосы на частоту собственных колебаний упругой системы клетки и на характер деформации x клетки, которая в явном виде входит в функцию момента. Поэтому момент сопротивления и его максимальная величина существенно зависят от того, как изменяется упругая деформация клетки в фазе заполнения очага металлом. В свою очередь x зависит от скорости увеличения давления, т.е. от скорости прокатки. В конечном итоге момент сопротивления и коэффициент статической перегрузки зависят от скорости прокатки (скорости вращения валков $\dot{\varphi}$) через угол φ поворота валков и деформацию клетки: $M(\varphi, x)$.

В работе [20] зависимость для момента сопротивления приведена как функция безразмерного времени, в которую входят три безразмерных (относительных) параметра. Отмечается также, что момент в фазе заполнения очага деформации незначительно превышает момент в установившемся режиме прокатки. Однако введение безразмерных параметров не позволило авторам установить прямое влияние на момент жесткости и деформации клетки и технологических параметров.

В 1977 году В.В.Смирнов и Р.А.Яковлев также получили формулы для момента в зависимости от угла α заполнения очага деформации металлом [21]. Отмечается влияние упругости клетки на характер изменения момента формоизменения.

В работах [22,23] показано, что при прокатке тонкой полосы по мере выбора «пружины» клетки при захвате возможно образование сечения выхода в очаге деформации до перехода процесса в установившуюся стадию. С.Л. Коцарь, В.Н. Хлопонин и В.А. Третьяков получили формулы для безразмерных усилия и момента прокатки с учетом контактного смятия валков в зависимости от расстояния входного сечения от линии центров валков. Авторы отмечают, что основное влияние на величину максимума момента оказывает «упругая деформация клетки или точнее отношение величины «пружины» клетки к абсолютному обжатию металла».

Следует отметить, что слово «момент» разные авторы употребляют в разных сочетаниях: «момент деформации» [11], «момент нагрузки», «статический момент» [21], «момент прокатки» [22,24], «момент (технологического) сопротивления» [2,6]. Не вдаваясь в подробности использования этих терминов, отметим, что, по сути, речь идет об одном и том же явлении – моменте, действующем на валки в период заполнения очага деформации металлом при захвате полосы и при её прокатке.

В некоторых работах при выводе выражения для момента учитывается составляющая, обусловленная упругим смятием рабочих валков [11,16,20], сопротивлением опорных валков [25] и выборкой зазоров [11]. В конечном итоге, после анализа выражений авторы отмечают, что влияние указанных составляющих момента незначительное, ими можно пренебречь, поэтому в дальнейшем учитывается только деформация клетки.

Анализ показывает, что формулы для момента сопротивления разными авторами получены при одних и тех же допущениях, поэтому для одних исходных данных получаются практически одинаковые результаты расчетов. Это указывает на то, что при разных подходах к аналитическому описанию процесса захвата в основе лежит единая суть механики явления. В то же время авторы дают разное объяснение причины отмеченного превышения момента сопротивления в процессе захвата полосы: деформация клетки, увеличение плеча момента, отношение «пружины» (деформации) клетки к обжатию, отношение жесткости полосы к жесткости клетки.

Недостаток большинства исследований состоит в том, что формирование усилия прокатки и момента на валках рассматривается без учета

взаимосвязи динамических процессов в упругой системе клетки и линии привода. Это не позволяет установить в какой связи находятся параметры, от которых зависят усилие и момент. Например, в работе [26] авторы учитывают инерцию и упругость клетки (при этом не акцентируется внимание на том, что принята одномассовая расчетная схема упругой системы клетки). В результате отмечается, что усилие и момент при заданных обжатии, среднем контактном давлении и коэффициенте плеча момента являются функциями времени t и безразмерных параметров $\beta_k \cdot T$ – произведения частоты колебаний клетки (авторы определяют её по формуле $\beta_k = \sqrt{C_k / m}$) на время захвата T и отношения упругой деформации клетки $P_{уст} / C_{кл}$ при установившемся процессе прокатки к абсолютному обжатию $\Delta h = h_o - h_l$. Такое завуалированное представление выражений для P и M не позволило авторам вскрыть более существенные связи. В частности, если преобразовать отношение $P_{уст} / C_{кл} / \Delta h = C_n / C_k$, то становится понятным, что определяющее значение имеют не деформация и обжатие, а жесткость полосы C_n в очаге деформации, жесткость клетки C_k и их отношение, как было ранее показано в [15,18]. Кроме того, авторы не учли, что, как показано в [19,27], частота собственных колебаний упругой системы клетки во время заполнения очага металлом переменная и зависит от жесткости полосы $\beta_k = \sqrt{(C_k + C_n) / m}$. В работе [8] отмечалось, что сила $P(\varphi, x)$ является функцией угла поворота валков и одновременно деформации x клетки. Исследование выражений для P и M , приведенных в [11,14,15,18,21,25], показало, что их можно представить в виде явной зависимости от x [18,27]:

$$P(\varphi(t), x(t)) = p_{ср} \cdot B \cdot r [\alpha + (\varphi - \alpha_o)] \quad (1)$$

$$M(\varphi(t), x(t)) = 2\psi p_{ср} \cdot B \cdot r^2 [2\alpha_o \varphi - \varphi^2 - x / r], \quad (2)$$

где угол встречи полосы с валками α_o и изменяющийся при заполнении очага угол захвата α связаны соотношением $\alpha^2(t) = \alpha_o^2 - x(t) / r$. Здесь $p_{ср}$ – среднее удельное давление в очаге; B – ширина полосы; ψ – коэффициент плеча момента; r – радиус валка.

В записи вида (1), (2) становятся понятными перекрестные связи усилия P и момента M через координаты φ и x , изменяющиеся во времени. Если выражения для P и M подставить соответственно в уравнения упругой системы клетки и крутильной системы линии привода (например, уравнения (2) и (1), приведенные в работе [8]), то в результате на каждом шаге решения в P и M будут поступать переменные φ и x , обусловленные динамическими процессами в этих системах. В этом случае получим изменение давления и момента с учетом взаимного влияния динамически изменяющихся φ и x .

По отношению к линии привода валков, где частота собственных колебаний составляет $\beta_{лпр} = 10 \div 20$ Гц, система клетки является высокочастотной $\beta_{кл} = 50 \div 150$ Гц (с учетом влияния жесткости полосы). За время заполнения очага деформации металлом клетка успевает сделать одно–два колебания, что отражается на характере изменения $x(t)$. Деформация клетки в свою очередь через (2) влияет на поведение кривой момента. При сравнительно малой скорости прокатки процесс нагружения валков моментом сопротивления M и реакция клетки $x(t)$ как–бы затянuty во времени (рисунок). При увеличенной скорости максимальное значение момента сопротивления увеличилось, однако длительность его действия уменьшилась, как следствие уменьшилась амплитуда первого пика момента сил упругости.

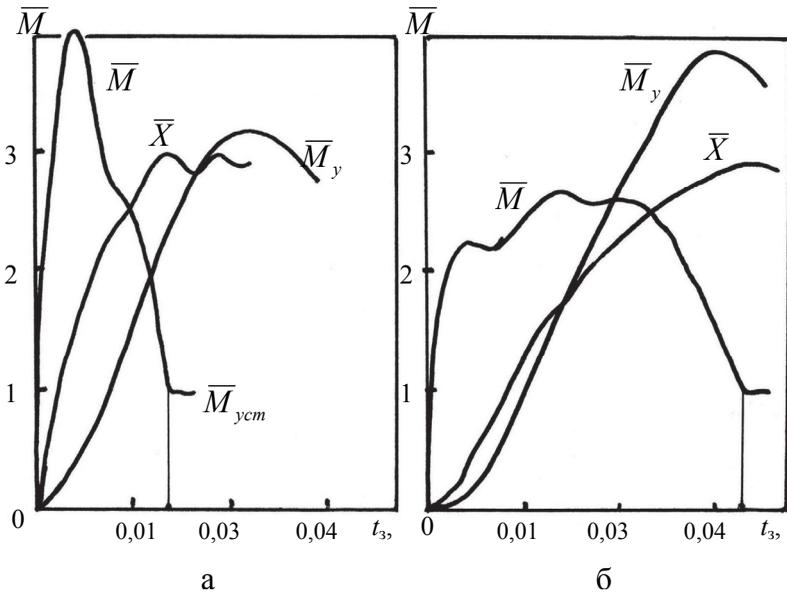


Рисунок. Изменение относительных значений момента сил технологического сопротивления, момента сил упругости в линии привода валков и деформации клетки стана 2800 при скорости захвата полосы 1,8 м/с (а) и 0,6 м/с (б). – значение момента в установившемся режиме прокатки, t_3 – время захвата (заполнения очага деформации металлом).

Выполненные Институтом черной металлургии опытно–промышленные измерения момента сил упругости в клетях широкополосных станов холодной прокатки 2500 (г.Магнитогорск), 1700 и 1400 (г.Темиртау, Казахстан) и горячей прокатки 2500, 2000, 1700 и 1680 (чистовые клетки) и теоретические исследования подтвердили изложенное в работе [12] предположение, что отмеченное на стане 2800 явление пре-

вышения момента сил сопротивления здесь также является одним из факторов, влияющих на динамические нагрузки [28,29].

Рассмотрим, какие получены результаты и определим направления дальнейших исследований.

1. На коэффициент K_c статического превышения момента решающее влияние оказывает отношение жесткости полосы в очаге деформации к жесткости клетки [8,18,19].

2. Вид графика функции момента существенно зависит от скорости прокатки при захвате полосы валками и частоты собственных колебаний упругой системы клетки [29].

3. При определенном сочетании частотных свойств линии привода, упругой системы клетки и скорости прокатки V_0 куполообразный вид момента максимально влияет на коэффициент динамичности K_d . При этом уменьшение или увеличение скорости относительно экстремальной точки V_0 ведет к уменьшению коэффициента K_d [28,29,30].

4. Подобный характер изменения момента сил упругости имеет место в других листовых станах холодной прокатки, т.к. момент прокатки в установленном режиме не зависит от скорости. В этих станах есть клеть, на которую приходится максимальное значение K_d [29,30].

5. В листовых станах горячей прокатки подобная зависимость для момента сил упругости отсутствует, поскольку с увеличением скорости момент сопротивления (прокатки) увеличивается.

6. При достаточно малой скорости прокатки динамические процессы в линии привода и клетки практически не проявляются и момент сил упругости повторяет кривую момента сил технологического сопротивления на валках.

В процессе решения задачи взаимодействия упругих систем линии привода и клетки применительно к листовым станам горячей и холодной прокатки выработан ряд методических моментов, которые необходимо учитывать при развитии исследований.

Упругую систему клетки следует представлять в виде 3–х...5–ти массовой расчетной схемы (рабочие, опорные валки, нажимной винт, стойки станины и др.). В этом случае по сравнению с одномассовой системой клетки получают более точное решение для перемещения $x(t)$ рабочего валка в процессе заполнения очага деформации металлом. Следовательно, повышается точность расчета функции момента (2), зависящей от $x(t)$. Кроме того, увеличивается точность определения продольного профиля утоненного переднего участка полосы, обусловленного тем, что начальный межвалковый зазор перед началом прокатки уменьшают на величину упругой деформации клетки. Параметры полученного профиля учитывают при захвате полосы валками следующей клетки, что сказывается на изменении момента. По мере прохождения полосы через клетки непрерывной группы получают окончательный профиль утоненного переднего участка. Его параметры, зависящие от режима обжатий, ширины и толщины гото-

вой полосы, необходимы для анализа движения переднего участка по рольгангу и уточнения условий захвата полосы моталкой.

Важным моментом при вычислении функции $M(\varphi(t), x(t))$ является определение момента t_3 времени, когда произошло заполнение очага деформации металлом (захват полосы). При статическом рассмотрении задачи предполагается, что этому моменту соответствует угол поворота вала $\varphi = \alpha_0$ и деформация клетки $x = x_0$ [10...15]. Если учитывать инерционность клетки, то определение времени захвата t_3 не столь очевидно. Например, когда валок повернется на угол α_0 и очаг деформации заполнится металлом, а из-за инерционности клетки её деформация (перемещение рабочего вала) $x(t)$ окажется меньше статического значения x_0 , соответствующего установившемуся режиму прокатки.

Более точное решение задачи определения t_3 получается, если учесть пластическое течение металла в заполняемом очаге деформации с учетом внешних зон. Однако подобные данные для тонких полос отсутствуют. Расчеты показывают, что влияние этого фактора существенно компенсируется, если учесть коэффициент вытяжки, который является переменной величиной в процессе движения переднего торца полосы в очаге деформации.

Модель динамического взаимодействия электромеханической системы линии главного привода и упругой системы клетки применяется в ИЧМ для моделирования взаимодействия через прокатываемую полосу клеток непрерывной группы полосового стана. Решаются следующие задачи.

1. Определение динамических нагрузок в полосе и оборудовании клеток в процессе захвата полосы валками при заполнении ею непрерывной группы, а также влияние этого режима на продольную разнотолщинность [31].

2. Определение нагрузок в квазиустановившемся режиме непрерывной прокатки при действии различных возмущений, в частности, при прохождении через клетки стана сварного соединения [32]. Несмотря на определенные успехи в её решении [32], остается не решенной задача выбора оптимальной скорости прокатки участка полосы со сварным соединением. Критерием здесь должны быть наименьшие динамические нагрузки в межклетевых промежутках, линии привода и в клетки. При качественном рассмотрении задачи во время «большой» (условно) скорости прокатки линия главного привода, как низкочастотная крутильная система, практически не отреагирует на скачкообразный импульс момента, действующего на валки со стороны сварного шва. В то же время упругая система клетки (высокочастотная колебательная система) максимально среагирует на импульс усилия прокатки. При «малой» скорости прокатки сварного соединения реакция линии привода валков проявляется более существенно. Из-за наложения крутильной составляющей колебаний на скорость вращения валков может произойти заметное рассогласование скорости выхода полосы из предыдущей клетки и скорости входа в следующую клетку и как следствие увеличится натяжение в полосе. Реакция упругой системы клетки будет наименьшая.

3. Определение информативных и диагностических признаков, зависящих от технологических возмущений и параметров технического состояния оборудования, в частности, угловых зазоров, обусловленных износом сочленяемых элементов в линии привода.

Учет отмеченных моментов при математическом моделировании переходных процессов позволил существенно увеличить точность определения максимальных динамических нагрузок в линии привода и клетки в период захвата полосы валками и разработать новые способы диагностирования ТС оборудования [33].

Заключение.

Комплекс научных результатов и практическая их проверка на листопрокатных станах, выполненные специалистами ИЧМ, позволили создать оригинальный способ описания переходных процессов и открыть новое направление, получившее развитие в современных исследованиях динамических и технологических нагрузок при прокатке листовой стали.

1. *Кожевников С.Н.* Определение действительных нагрузок в линиях передач тяжелых машин // Труды семинара по ТММ. – 1951. – Т.ХШ. – С.15-19
2. *Большаков В.И.* Исследование нелинейных электромеханических систем приводов прокатных станов с упругими связями на электронных моделях // Автореферат дис. канд. техн. наук.– Днепропетровск. ИЧМ. 1966.– 18 с.
3. *Влияние зазоров на динамические нагрузки в главной линии стана 2800 / В.И.Большаков, С.Н.Кожевников, Ю.Я.Кармазин и др.* // Известия вузов. Черная металлургия, – № 6. – 1967. – С.162–168.
4. *Исследование влияния параметров системы управления электродвигателем на динамические нагрузки привода прокатного стана / А.Н.Ленский, В.И.Большаков, И.П.Борщ и др.* // Динамика металлургических машин. М.: Металлургия, 1969. – XXXI. – С.57–64.
5. *Чекмарев А.П.* Влияние скорости прокатки на величину крутящего момента при захвате на стане холодной прокатки 2800 / А.П.Чекмарев, М.М.Сафьян, В.П.Холодный и др. // Металлургическая и горнорудная пром–сть, 1966. – январь–февраль. – С. 30–32.
6. *Кожевников С.Н., Большаков В.И.* Исследование на электронной модели динамики электромеханической системы привода уширительного стана // «Теория механизмов и машин», Межведомственный сборник, изд. ХГУ, вып.1, 1966.– С.10–18.
7. *Экспериментальное исследование перемещения валков в период захвата полосы / С.Н.Кожевников, М.М.Сафьян, П.Я.Скичко и др.* // Труды ИЧМ. т.ХХІХ, 1969. – С.395–400.
8. *Кожевников С.Н., Большаков В.И.* Взаимодействие упругих механических систем станины и привода машины при нагружении // Сб. «Теория механизмов и машин», Харьков, ХГУ, 1970, вып.10. – С.3–8.
9. *Сафьян М.М., Большаков В.И., Василев Я.Д.* Влияние формы переднего конца листа на величину динамических нагрузок в линии передачи стана // «Прокатное производство». Труды ИЧМ, т.ХХІХ. М.: Металлургия, 1969. – С.105–110.

10. *Чекмарев А.П., Сафьян М.М., Василев Я.Д.* Исследование момента прокатки при захвате // Бюл. Ин-та «Черметинформация». 1967. – № 12 (560). – С. 42.
11. *Чекмарев А.П., Сафьян М.М., Василев Я.Д.* О расчетном определении момента деформации при захвате // Прокатное производство. 1971. – LVI. – С. 105–117.
12. *Большаков В.И.* Технологические нагрузки листопркатных станов // «Динамика металлургических машин», Труды ИЧМ, т.XXXI. М.: Металлургия, 1969. – С.5–13.
13. *Сафьян М.М., Василев Я.Д.* Экспериментальное исследование момента деформации при захвате // Обработка металлов давлением. 1971. – LVI. – С.117–122.
14. *Исследование влияния жесткости рабочих клетей листовых станов на момент деформации при захвате / А.П.Чекмарев, М.М.Сафьян, Я.Д.Василев и др. // Обработка металлов давлением. 1971. – Вып. LVI. – С. 192–196.*
15. *Большаков В.И.* Момент, действующий на валки при захвате листов // В сб. «Листопркатное производство». Вып.1. МЧМ СССР. М.: Металлургия, 1972. – С.109–112.
16. *Особенности расчета крутящего момента при полистной прокатке / А.И.Герцев, В.К.Орлов, И.М.Меерович и др. // Тр. ВНИИМетмаш. – 1971. – № 29. – С. 225–233.*
17. *Бровман М.Я.* Изменение момента прокатки при захвате металла валками // Теория прокатки (под ред. А.П.Чекмарева). – 1975. – С. 168–171.
18. *Большаков В.И.* Анализ зависимости момента сопротивления при захвате от параметров клетки и прокатываемого листа // В сб. «Листопркатное производство». – № 3. – М.: Металлургия, 1974. – С.123–127.
19. *Веренев В.В.* Исследование динамики главных линий непрерывных широкополосных станов горячей прокатки и влияния динамических процессов на продольную разнотолщинность полос // Автореф. дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.04.04 «Машины и агрегаты металлургического производства» – Днепропетровск. ИЧМ, 1975. – 20 с.
20. *Определение крутящих моментов и давлений на валки при заполнении металлом очага деформации в листовых станах горячей прокатки // А.А.Филатов, С.Д.Гарцман, Б.Е.Житомирский и др. // Тр. ВНИИметмаш. 1975. – № 38. – С.53–80.*
21. *Смирнов В.В., Яковлев Р.А.* Механика приводов прокатных станов // М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
22. *Коцарь С.Л., Хлопонин В.Н., Третьяков В.А.* Момент прокатки при захвате тонкой полосы // Изв. вузов. Черная металлургия, 1986. – № 1. – С. 67–71.
23. *Коцарь С.Л., Третьяков В.А.* Энергосиловые параметры в нестационарной стадии тонколистовой прокатки // Изв. вузов. Черная металлургия, 1986. – №3. – С. 58–61.
24. *Динамика процессов прокатки / С.Л. Коцарь, В.А. Третьяков, А.Н. Цупров и др. // М.: Металлургия, 1997. – 255 с.*
25. *Скичко П.Я., Леена И.И.* Момент сил сопротивления при прокатке листов // Металлургическая и горнорудная пром-сть, 1970. – № 3. – С. 38–41.
26. *Гарцман С.Д., Рубанович Ю.А., Филонов А.А.* Определение усилий и моментов прокатки при заполнении металлом очага деформации с учетом инерции и упругости клетки // Производство проката, 1998. – № 17. – С. 20–23.

27. *Скичко П.Я., Леена И.И., Вернев В.В.* Инженерная оценка влияния податливости клетки на технологические нагрузки и частотные характеристики листовых станов // Листопрокатное производство. ИЧМ, 1974. – № 3. – С. 23-28
28. *Вернев В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Влияние особенностей изменения момента технологического сопротивления на динамику главных приводных линий чистовых клетей // Защита металлургических машин от поломок. Вып. 3. Мариуполь: ПГТУ. 1998. – С. 35–39.
29. *Вернев В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Влияние скорости прокатки при захвате полосы на динамические нагрузки в линии привода прокатной клетки // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.14. – С. 260–266.
30. *Переходные процессы в электро– гидромеханических системах металлургических машин.* Монография. / В.И.Большаков, В.Е.Злобинский, Б.А.Харлан и др. // Днепропетровск, 2002. – 423 с.
31. *Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680 / В.В. Вернев, В.И. Большаков, А.Ю. Путноки и др. // Днепропетровск: ИМА–пресс, 2011. – 184с.*
32. *Прокатка металла со сварными соединениями / В.Л.Мазур, В.И.Мелешко, Д.П.Галкин и др. // М.: Металлургия, 1985. – 112с.*
33. *Диагностика и динамика прокатных станов / В.В.Вернев, В.И.Большаков, А.Ю.Путноки и др. // Днепропетровск: ИМА–пресс, 2007. – 144с.*

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук И.Г.Муравьевой*

В.І.Большаков, В.В.Вереньов

Історія розвитку наукової розробки в області прокатки листів

Розглянуто роботи, в яких досліджується специфічний (куполоподібний) вигляд моменту сил технологічного опору (прокатки) під час захвату тонкої штаби валками. Показано, що комплекс наукових результатів, отриманих спеціалістами ІЧМ НАН України, дозволив створити оригінальний спосіб для описування перехідних процесів та відкрити новий напрямок дослідження динамічних та технологічних навантажень, що отримав широкий розвиток у сучасних дослідженнях. Визначено напрямки для подальших досліджень.