

**В.И. Большаков, В.В. Веренев**

**РАЗВИТИЕ ИДЕЙ С.Н.КОЖЕВНИКОВА В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИНАМИКИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ**

Представлено краткое изложение основных идей С.Н. Кожевникова по исследованиям динамики прокатных станов и их развитию за последние 20 лет в отделе технологического оборудования ИЧМ.

Член–корреспондент Академии наук Украины С.Н.Кожевников по праву считается основателем нового научного направления – динамика тяжелых металлургических машин. Теоретические основы этого направления, преимущественно на базе прокатных станов, заложены им в монографии [1], затем развиты и обобщены в работе [2]. Большой опыт научных исследований, широкий кругозор и знание потребностей металлургической промышленности позволили Сергею Николаевичу ставить и решать актуальные проблемы, касающиеся автоматизации металлургических агрегатов, повышения надежности их работы и производительности. В качестве примера можно указать цикл разработок по исследованию, расчету и выбору рациональных режимов работы обжимных, пилигримовых и листопрокатных станов, по изучению процессов биений при колебаниях электромеханических систем приводов при различных режимах работы, приводов, включающих замкнутые контуры, определению параметров нелинейных упругих муфт и др. [3]. Всестороннее изучение приводов обжимных станов позволило усовершенствовать конструкцию приводов пильгерстанов и выполнить систематизацию динамических нагрузок приводов для их расчетов на прочность и органическую долговечность [4].

Наряду с решением научных проблем Сергей Николаевич ставил конкретные научные задачи, тесно связанные с проектированием, эксплуатацией и исследованием прокатных станов с учетом технологических процессов. Вследствие разработки новых конструкций и узлов прокатных клетей, модернизации станов, повышения производительности, ужесточения деформационно–скоростных режимов, внедрения новых, в частности, энергосберегающих технологий в последние 15–20 лет появилась необходимость расширения и углубления исследований. В статье показано развитие основных идей С.Н.Кожевникова в Институте черной металлургии НАН Украины при исследованиях динамических процессов в прокатных станах.

Широкополосный стан горячей прокатки 1680 один из первых агрегатов, на котором под руководством С.Н.Кожевникова в конце 1950–х годов были выполнены обширные экспериментальные исследования [5]. Было установлено, что основными причинами, вызывавшими высокий

уровень ударных нагрузок в период захвата металла валками, являются скорость прокатки, температура переднего конца полосы и форма «языка», биения момента сил упругости и угловые зазоры в сочленениях.

С.Н.Кожевников исключительное внимание уделял экспериментальным исследованиям таких уникальных машин, изготавливаемых в единичных экземплярах, как прокатные станы. С одной стороны, эти данные позволяли установить фактический характер переходных процессов и уровень максимальных динамических нагрузок и выявить новые закономерности. С другой стороны, они являлись основой и критерием того, насколько правильно и точно разработаны соответствующие математические модели процессов [6]. Уверенность в обоснованности последних позволяет путем моделирования определять особенности динамических процессов и нагрузки в точках главных линий, недоступных для прямых измерений, исследовать влияние на динамику большого количества конструктивных и технологических факторов.

В непростые перестроечные времена народного хозяйства и науки в СССР и построения рыночных отношений в странах СНГ и Украины сотрудниками Института черной металлургии выполнены экспериментальные исследования полосовых станов горячей и холодной прокатки, заготовочных, мелкосортных и проволочных станов. Получен ряд новых результатов.

Установлена зависимость коэффициента динамичности  $K$  на участке двигатель – редуктор от обобщенного параметра  $n$ , зависящего от конструктивных параметров линии главного привода [7,8]. Впервые на роль этого параметра (отношения двух низших собственных частот  $n = \beta_2/\beta_1$ ) и процесса биений момента сил упругости в период захвата полосы валками указал С.Н.Кожевников [1,6]. С помощью зависимости  $K(n)$ , определенной на обширной базе данных промышленных исследований широкополосных станов, стало возможным обосновать выбор рационального значения параметра  $n$ , к достижению которого необходимо стремиться при проектировании главных линий и их реконструкции. Задача оптимизации конструктивных параметров впервые поставлена С.Н.Кожевниковым в работах [1,5]. Тогда же был разработан метод её решения, а методика электронного моделирования передана НКМЗ.

Накопление экспериментальных данных, их статистическая обработка, а также детальное исследование зависимости отношения частот от масс и жесткостей позже позволило разработать совместно с НКМЗ методику выбора рациональных конструктивных параметров – диаметров и длин основных элементов главных линий привода валков [9,10].

В 1953 г. С.Н.Кожевников опубликовал статью [11], в которой показал, что характер изменения момента внешних сил, т.е. нагружения валков, оказывает решающее влияние на динамические нагрузки в

упругих связях. Отмечалась существенная роль баллистического эффекта изменения нагрузки.

В диссертации В.И.Большакова [12], выполненной под руководством С.Н. Кожевникова впервые описан процесс увеличения момента сопротивления при захвате листов, показаны причины этого явления и изучено его влияние на динамические нагрузки привода при изменении скорости вращения валков. При исследовании одноклетьевого стана 2800 холодной прокатки крупногабаритных листов из нержавеющей стали С.Н. Кожевников, В.И. Большаков, А.П. Чекмарев, М.М. Сафьян, Я.Д. Василев оценили влияние этого эффекта на изменение нагрузок в линии привода после захвата листов.

Если раньше принимали (для многих случаев достаточно обоснованно), что в период заполнения очага деформации металлом при захвате полосы момент сил технологического сопротивления изменяется по линейному или экспоненциальному закону, то на стане 2800 он имел куполообразный вид. На эту тему появилось свыше 20 публикаций, в которых предлагались разные выражения для описания момента сил технологического сопротивления. Они отражали общую суть влияния на нагружение такой характеристики клетки, как податливость (жесткость) её станины. Последующие исследования, выполненные в ИЧМ, позволили установить роль скорости прокатки, обжатия, жесткости полосы в очаге деформации в формировании функции момента и существенно уточнить расчетную схему упругой системы клетки, в которую была введена жесткость полосы [12,13].

В 1970-х годах в ИЧМ разработана плодотворная математическая модель динамического взаимодействия крутильной системы линии главного привода и упругой системы клетки [14, 15], в которой в отличие от предыдущих исследований учтены отмеченные выше эффекты. С помощью этой модели выполнены комплексные компьютерные исследования взаимосвязи динамических процессов в электромеханической системе линии привода и клетки с учетом конструктивных параметров, технологических параметров прокатки, а также технического состояния оборудования (зазоры в различных участках). Впервые получено уравнение продольной разнотолщинности прокатываемой полосы в динамике, из которого как частный случай следует известное уравнение в статике. В этом уравнении учтены частотные свойства упругой системы клетки и их зависимость от жесткости полосы в очаге деформации [15].

В конечном итоге установлено влияние куполообразного характера изменения момента сопротивления на валках на динамические нагрузки. Установлено, что имеется такое сочетание частотных свойств клетки, линии привода и скорости прокатки, при котором система максимально реагирует на возмущение [16]. Сравнительный анализ результатов моделирования и данных натурных измерений показал, что, несмотря на

идентичность кинематических схем линий привода и жесткости клетей среди чистовых клетей широкополосных станов имеются 1–2 клетки с наибольшим значением коэффициента динамичности. Аналогичные результаты получены для клетей станов порулонной холодной прокатки полос типа 1700. В обоих типах станов решающую роль в формировании куполообразного («баллистического») эффекта оказала скорость прокатки (захвата полосы).

В работе [5] Сергей Николаевич отмечал, что в чистовых клетях динамические нагрузки в линии привода зависят от технологических параметров прокатки и формы «языка» на переднем участке полосы. В настоящее время в ИЧМ разработана методика и достаточно полно исследовано влияние на максимальные динамические нагрузки и коэффициент динамичности по участкам линии привода отклонения от номинальных значений толщины, ширины и температуры полосы, скорости прокатки, сопротивления деформации, коэффициента трения. Исследованы теоретически и экспериментально вопросы прокатки слябов и полос с фигурной передней кромкой [15,17,18], разработан ряд технических решений по способам формирования фигурной кромки и прокатки слябов на ШПС. На стане 1700 комбината им. Ильича внедрена прокатка в черновых клетях слябов с V-образным выступом, который формируется с помощью ножниц слябинга [19].

В последние годы получили развитие исследования динамического взаимодействия смежных клетей через толстую прокатываемую полосу. Начало этим исследованиям на примере универсального обжимного стана положил С.Н. Кожевников, по его инициативе начата работа [20]. Необходимость обращения к этой задаче обусловлена практическими потребностями, в частности, прокатки слябов в парах черновых клетей стана 1680, составляющих три непрерывные подгруппы. Разработана уточненная математическая модель, в которой учтена отмеченная выше взаимосвязь крутильной и поступательной систем клетки, опережение в очаге деформации, межклетьевое усилие в полосе [21]. Получены и объяснены новые результаты взаимодействия клетей через толстую полосу. В частности, определены режимы прокатки, при которых во время захвата полосы в последующей клетке формирующийся в полосе мгновенный подпор воспринимается валками предыдущей клетки в виде дополнительного сопротивления. В результате в её линии привода возникает повторный колебательный процесс, а максимальный момент сил упругости становится соизмеримым с пиковым моментом при собственном захвате полосы. Данные натуральных измерений в черновой непрерывной трехклетевой подгруппе стана 2000 (г. Череповец) и в подгруппах стана 1680 подтвердили результаты компьютерного моделирования [22]. С помощью разработанной модели впервые получена картина формирования высокочастотной составляющей продольной

разнотолщинности полосы в чистовых клетях в переходных режимах работы – захват и выход полосы из непрерывной группы ШПС [23].

На непрерывных станах холодной прокатки полос на основании экспериментальных исследований установлено, что в определенных зонах скорости прокатки в главных линиях некоторых клетей возникают резонансные режимы. Установлены причины и условия увеличения амплитуды крутильных колебаний. Подобные явления объяснены для двухклетевых высокоскоростных дрессировочных станов, где отмечено одновременное увеличение колебаний в линии привода и вибраций корпуса моталки, разматывателя, редукторов и станин клетей [24]. В результате исследований разработаны технологические и конструктивные решения, направленные на уменьшение вибродинамических процессов. Раскрыт механизм влияния оборудования на появление дефекта «ребристость» на поверхности холоднокатаных полос при дрессировке на станах 2500 (г. Магнитогорск) и 1700 (г. Темиртау). Основной причиной являются вибрации, возникающие в шпинделях рабочих валков из-за кинематической погрешности и бокового зазора в зубчатом зацеплении приводной линии [25].

Сочетание экспериментальных и теоретических методов исследования динамики машин, пропускной способности технологических линий, систем автоматизированного управления металлургическими агрегатами позволили создать уникальную научно-методическую базу исследования машин и агрегатов, которая продолжает развиваться сегодня и позволяет обеспечить эффективную работу металлургического оборудования и комплексов металлургического производства. Методика исследований динамики металлургических машин, по существу, была разработана и изложена в работах [1–12], однако её компактное концентрированное изложение отсутствовало. Такое изложение основных методических положений исследования динамики электромеханических систем приводов машин с нелинейными упругими связями выполнено в работе [26].

С.Н. Кожевников уделял большое внимание вопросу установления причин повышенных динамических нагрузок и колебательных процессов в оборудовании действующих прокатных станов, а также их экспериментальным исследованиям. Фактически им и его школой велось диагностирование нагрузок и состояния оборудования (в частности, угловых зазоров) несмотря на то, что долгое время этот термин в работах по динамике станов не применялся. С начала 1990-х годов в ИЧМ начало развиваться направление вибродинамической диагностики оборудования прокатных станов, в основу которого положены переходные процессы при разных режимах работы, прежде всего во время захвата полосы валками [27]. Все предыдущие исследования показали, что этот режим является исключительно информативным. Разработан ряд способов диагностирования оборудования, которые успешно опробованы на

действующих станах [28]. Сотрудниками ИЧМ разработан и используется в исследовательских целях опытный комплект системы диагностирования. Сигналы восьми вибродатчиков, установленных вдоль линии привода через АЦП поступают в ПЭВМ, формируются в файлы, затем анализируются с помощью корреляционного, спектрального и др. анализа. Дальнейшее развитие и углубление этого направления с учетом конструктивных, технологических и режимных параметров является достойным продолжением развития научных и прикладных идей С.Н.Кожевникова.

Динамика прокатных станов, как научное направление и составляющая многогранного творческого наследия выдающегося ученого–механика, чл.–корр. Академии наук Украины С.Н.Кожевникова, продолжает успешно развиваться научной школой ИЧМ, у истоков которой стоял большой ученый. Его идеи и разработки развиваются на базе комплексного экспериментального и теоретического исследования взаимосвязи вибродинамических процессов во всех узлах оборудования, технологии прокатки, режимов работы станов и их технического состояния с использованием современной вычислительной техники и компьютерных технологий. Такой подход, заложенный С.Н. Кожевниковым, является основой достоверного определения максимальных нагрузок машин, увеличения точности расчетов на прочность и долговечность, оптимального проектирования, предотвращения поломок и аварий, создания научно–методической базы диагностики состояния оборудования и его оптимального обслуживания.

1. *Кожевников С.Н.* Динамика машин с упругими звеньями. – Киев: Изд. АН УССР, 1961. – 312 с.
2. *Кожевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев: Наук. думка. 1986. – 288 с.
3. *Праздников А.В., Большаков В.И.* Современное состояние и задачи динамики металлургических машин. // В сб. Динамика машин. – М.: Наука, 1974. – С.150–165.
4. *Кожевников С.Н., Большаков В.И.* Динамические нагрузки главных линий прокатных станов и учет этих нагрузок при расчетах на прочность и выносливость. // Тр. I Всесоюзной конференции по расчетам на прочность и выносливость. ВНИИМетмаш. – Сб. № 23.– М.: 1968. – С.28–46.
5. *Кожевников С.Н., Скичко П.Я.* Экспериментальное исследование главных линий чистовой группы клетей непрерывного тонколистового стана 1680 завода «Запорожсталь» // Известия вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 12. – С. 179–184.
6. *Опыт исследования динамики главных приводов прокатных станов с учетом упругих связей и зазоров / С.Н.Кожевников, П.Я.Скичко, А.Н.Ленский, В.И.Большаков, И.И.Лепа // «Динамика металлургических машин», Труды ИЧМ, т. XXXI. – М.: Металлургия, 1969. – С.5–13.*

7. *Снижение ударных нагрузок в широкополосных станах горячей прокатки* / В.В.Веренев, О.Н.Кукушкин, В.И.Пономарев, И.А.Бобух // «Черная металлургия. Бюл. науч.техн.инф.». – Вып.11 (1087). – 1989. – С.25–36.
8. *Динамические перегрузки в приводах клетей широкополосных станов* / В.В.Веренев, В.И.Большаков, Ю.И.Белобров, И.А.Бобух // Металлургическая и горнорудная промышленность. – № 1. – 1999. – С. 72–75.
9. *Конструктивные пути уменьшения динамических нагрузок в клетях прокатных станов* / Ю.Н. Белобров, И.А. Бобух, В.И. Большаков, В.В. Веренев // Ин-т «Черметинформация». Бюл. Черная металлургия. – Вып.3–4. М.. – 1996. – С.52–55.
10. *Веренев В.В.* Инженерная методика выбора оптимальных конструктивных параметров линии привода прокатного стана // Сб.научных трудов Национальной горной академии Украины. – № 13. – Том 3. Дн-ск: Навчальна книга, 2002. – С. 9–12.
11. *Кожевников С.Н.* Определение действительных нагрузок в линиях передач тяжелых машин / Труды семинара по теории машин и механизмов. – Том XIII. – Вып.51. – М.: Изд-во АН СССР,1953. – С.5–26.
12. *Большаков В.И.* Исследование нелинейных электромеханических систем приводов прокатных станов с упругими связями на электронных моделях. Автореф. дисс. ... к.т.н. Дн-ск, ИЧМ. 1966. – 18 с.
13. *Влияние жесткости прокатываемой полосы на динамические свойства клетки* / П.Я.Скичко, В.В.Веренев, И.И.Лепа, В.Д.Петров // В сб. «Листопркатное производство». – № 4. – М.: Металлургия, 1975. – С. 69–73.
14. *Кожевников С.Н., Большаков В.И.* Взаимодействие упругих механических систем станины и привода машины при нагружении // В сб. «Теория механизмов и машин». – Вып. 10. – Харьков: ХГУ, 1970. – С. 3–8.
15. *Веренев В.В.* Исследование динамики главных линий непрерывных широкополосных станов горячей прокатки и влияние динамических процессов на продольную разнотолщинность полос». Автореферат дис.канд.техн.наук. Днепрпетровск, ИЧМ, 1975 г.
16. *Веренев В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Влияние особенностей изменения момента технологического сопротивления на динамику главных приводных линий чистовых клетей / Сб. Защита металлургических машин от поломок. – № 3. –Мариуполь, 1998. – С.35–39.
17. *Эффективность* снижения динамических нагрузок при прокатке полос с  $V$ -образной передней кромкой /В.В.Веренев, П.Я.Скичко, А.М.Юнаков, С.А.Братусь // В сб. «Теория и практика производства широкополосной стали». – № 4. –М.: Металлургия, 1979. – С.26–29.
18. *Снижение* динамических нагрузок в черновых клетях широкополосного стана 1700 при прокатке полос из слэбов с фигурной кромкой /В.В.Веренев, П.Я.Скичко, С.А.Братусь и др. // «Черная металлургия. Бюл. науч.–тех. инф.». – Вып. 1 (861). – 1980. – С.35–36.
19. *Снижение* ударных нагрузок в черновых клетях стана 1700 путем формирования фигурной кромки на ножницах слябинга./ В.В. Веренев, В.А. Клименко, В.Г. Мангуш и др. // «Металл и литье Украины». – 1997. – № 2–4. – С.42–44.
20. *Лепа И.И.* Экспериментальное и теоретическое исследование нагрузок в главных линиях непрерывно-заготовочного стана с учетом взаимодействия

клетей через прокатываемую заготовку. Автореф. дисс. к.т.н. Дн–ск. ИЧМ. 1968.

21. *Путноки А.Ю., Веренев В.В.* Модель динамического взаимодействия смежных черновых клетей широкополосного стана при непрерывной прокатке. / *Металл и литье Украины.* – 2002. – № 12. – С.26–30.
22. *Веренев В.В., Путноки А.Ю., Мацко С.В.* Динамика взаимодействия черновых клетей через прокатываемую полосу. / *Литье и металлургия.* – № 2(34). – 2005. – С.81–86.
23. Влияние динамического взаимодействия чистовых клетей ШПС на продольную разнотолщинность полосы. / В.В. Веренев, Н.И. Подобедов, А.Ю. Путноки, С.В. Мацко // Удосконалення процесів і обладнання з обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Темат. зб. наук. праць. – ДГМА. Краматорськ, 2006. – С.129–132.
24. *Веренев В.В., Кукушкин О.Н., Зиновьев Е.Г.* Влияние динамических процессов в оборудовании полосовых станов на качество и выход годного: Обзор по системе Информсталь // Ин-т «Черметинформация». – М.: – 1990. – Вып.4(361). – 33 с.
25. *Причины* возникновения и пути устранения дефекта «ребристость» на поверхности холоднокатаных полос. / И.И. Леева, К.С. Логинова, В.Л. Мазур и др. // *Сталь.* –1978. – № 7. – С.634–635.
26. *Большаков В.И.* Методика исследования динамики приводов металлургических машин. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2000, – № 3. – С.72–78.
27. *Веренев В.В.* Диагностика технического состояния оборудования по данным вибродинамических процессов в переходных режимах работы прокатного стана // *Труды четвертого конгресса прокатчиков.* – Т. 2. – Москва. – 2002. – С.273–276.
28. Расширение возможностей вибродиагностирования оборудования прокатных клетей / В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путноки и др. // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита.* Н.–техн. и произв. сб. ст. Донецк. – 2005. – Вып..1. – С.14–16.

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. С.М.Жучковым*