

П.В. Крот, Н.В. Нижник,

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ДЕМПФИРУЮЩИХ ВКЛАДЫШЕЙ ДЛЯ ШПИНДЕЛЕЙ ЛИСТОПРОКАТНЫХ СТАНОВ

*Институт черной металлургии НАН Украины
Донецкий национальный технический университет*

Выполнен анализ вариантов конструктивного исполнения износостойких демпфирующих вкладышей для шпинделей прокатных станов с использованием полимерного материала капролона, приведены результаты лабораторных исследований напряжений во вкладышах и расчеты методом конечных элементов.

Современное состояние вопроса.

С момента разработки конструкции шпинделей на телах скольжения на крупногабаритных металлургических агрегатах существует проблема повышенного износа бронзовых вкладышей, и в первую очередь при эксплуатации линий привода прокатных станов.

Практика эксплуатации универсальных шпинделей в приводах прокатных станов свидетельствует о недолговечности вкладышей шарниров скольжения. Основной причиной частых периодических замен (или аварийных отказов) шпиндельных соединений является повышенный зазор в шарнире из-за износа бронзовых вкладышей. На обжимных и листопркатных станах диаметры головок шпинделей доходят до 900–1000 мм, поэтому износ вкладышей, допускаемый по правилам технической эксплуатации агрегатов, достигает 5–8 мм и более, что в зависимости от конструктивного исполнения и схемы главных линий привода прокатных станов составляет 60–70% суммарного зазора.

Несовершенство большинства применяемых конструкций устройств уравнивания (пружинные, гидравлические, с противовесом) в основном обеспечивают необходимые условия только для монтажа шпинделей и валковых муфт. В процессе прокатки различного сортамента постоянно изменяющийся раствор валков и их диаметры при перевалках не позволяют полностью компенсировать вес шпинделей. Исследования шпиндельных узлов, проведенные в работе [1], показали отклонения на 30–50% коэффициента динамичности (Кд) в зависимости от углового положения (горизонтально–вертикально) лопасти шпинделя. Некомпенсированный в пределах $\pm 5\%$ даже минимальный вес шпинделей 25 кН (достигающий 100–200 кН) приводит к двукратному раскрытию зазоров за один оборот валков. Открывающиеся угловые зазоры, в зависимости от упруго-массных параметров механической системы и характера прикладываемой нагрузки, могут приводить к значительным динамическим нагрузкам в линиях привода и аварийным поломкам, как самих шпинделей, так и дру-

гого оборудования клетей (хвостовики рабочих валков, шестеренные валы, муфты, редукторы).

Альтернативными способами передачи крутящего момента к рабочим валкам с изменяющимся угловым положением валов являются конструкции шпинделей на телах качения и карданные передачи [2], которые имеют зазоры не более 1,0–1,5 мм, нашедшие применение большей частью в клетях правильных и гибочных машин, сортовых и заготовочных станах. В связи с малой нагрузочной способностью данные конструкции не нашли широкого распространения в черновых клетях листопрокатных и обжимных станов, где крутящие моменты на валках с учетом динамики достигают 3000–5000 кН м.

Вторым вариантом решения проблемы износостойкости шпинделей является разработка конструкций вкладышей и сопрягающего узла, снижающих биения головок и валковых муфт. При захвате заготовки и последующей передаче нагрузки шпинделем в одном из крайних положений, смещенных относительно центра валка, износ вкладышей и угловая траектория скольжения будут пропорциональны эксцентриситету, возникающему за счет износа сухаря и прорези на валковой муфте.

Исследования, проведенные на кафедре МОЗЧМ ДонНТУ [3], показали, что основной причиной низкого срока службы вкладышей являются недостатки традиционной конструкции шпинделя с сухарем:

- износ вкладыша, приводящий к возникновению зазоров в шарнире и крутильным колебаниям в линии привода в момент захвата металла валками;
- наличие эксцентриситета между геометрическими осями валка и шпинделя, обуславливающего развитие центробежной силы инерции, которая приводит к разнотолщинности полос с частотой биений шпинделя;
- нарушение кинематики соединения из-за зазоров в шарнире и перераспределение нагрузок на контактных поверхностях (передача части крутящего момента за счет сухаря, работа вкладыша на изгиб, его излом).

Опыт эксплуатации шпинделей показал, что среди всего комплекса мероприятий по повышению долговечности шпиндельных соединений (изменение материала вкладышей, условий подачи смазки) наиболее эффективной мерой является совершенствование конструкции. Разработанная конструкция универсального шпинделя [4], содержит дополнительный центрирующий сферический узел, расположенный на пересечении геометрических осей рабочего валка и шпинделя. Принципиальное отличие данной конструкции состоит в отсутствии сухаря в центре шарнира, что позволяет увеличить площадь контакта вкладышей с лопастью и снизить контактные нагрузки. Универсальный шарнир данной конструкции представлен на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Сферический опорный узел располагается в торцевой проточке лопасти 1. Внешнее кольцо 5 сферического подшипника помещено в корпус 6. Корпус 6 жестко соединен с вилкой 2. Внутреннее кольцо 3 сферического подшипника установлено на ось 9, жестко взаимосвязанную с вилкой 2. Фиксация

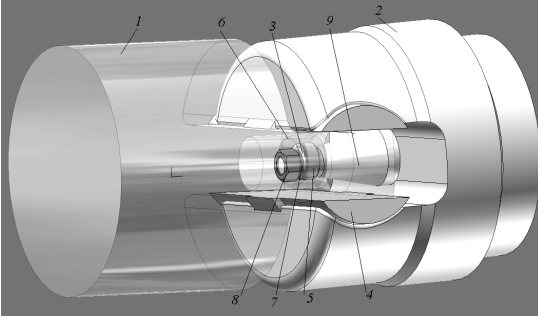


Рис.1. Конструкция шпинделя с самоцентрирующим элементом

кольца 3 на оси осуществляется гайкой 8 и винтом 7. Центрирующий узел обеспечивает дополнительную кинематическую связь в геометрическом центре шарнира шпинделя, что при вращении исключает возникновение эксцентриситета из-за износа контактирующих элементов (сухаря и вилки на лопасти валковой муфты).

Опробование шпинделя в клети №5 заготовочного стана 550 Енакиевского металлургического комбината показало существенное увеличение срока службы вкладышей с 3–4 недель до 7–ми месяцев.

Исследования напряженно–деформированного состояния вкладышей для шарниров традиционной и усовершенствованной конструкции показали, что значение максимальных напряжений в теле вкладыша для шарнира с центрирующим узлом на 21% ниже, чем для шарнира с сухарем.

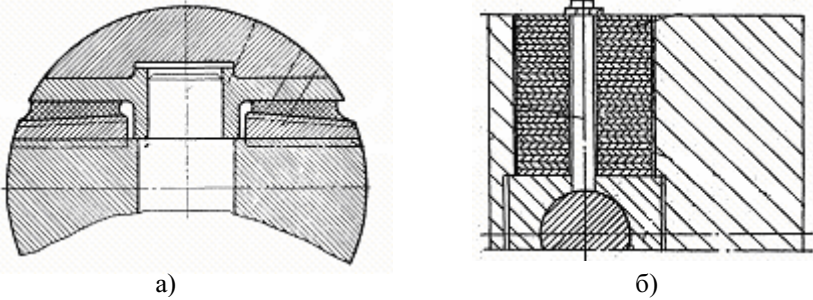
Поскольку зазоры в той или иной мере существуют в процессе эксплуатации при любых конструкциях шпинделей, то эффективным способом снижения их влияния на динамические нагрузки является разработка демпфирующих элементов, которые бы одновременно имели большую износостойкость, чем бронзовые вкладыши.

Исследования по разработке новых конструкций демпфирующих резино–металлических элементов, в т.ч. для линий привода прокатных станов, проводились ранее в ИЧМ [5,6]. Применялись различные варианты элементов и втулок для пальцевых муфт и шпинделей. При анализе динамических нагрузок в шпиндельных устройствах на четырехмассной схеме привода стана 2800 установлено, что введение упругих элементов на шпинделях увеличивает разность первых собственных частот системы и устраняет биения крутильных колебаний нагрузки. Основными недостатками резино–металлических конструкций является малая нагрузочная способность и нестабильность механических свойств резины.

Проблема перехода на новые конструкции состоит в необходимости полной замены шпинделей и всех комплектов валковых муфт, что не всегда приемлемо для служб эксплуатации металлургических предприятий.

Научно–техническую проблему и практический интерес представляет разработка износостойких демпфирующих вкладышей, которые не требуют внесения изменений в конструкцию шпинделей. На Рис. 2 представ-

лены конструкции вкладышей с полимерными демпфирующими вставками [7] и выполненные в виде пакета стальных пластин [8]. Наиболее перспективными с точки зрения реализации на листопркатных и обжимных станах являются конструкции вкладышей с армирующими стальными элементами. Вкладыши с металлическим каркасом [9] или вставными элементами [10] на Рис. 3, имеют повышенную нагрузочную способность при высокой износостойкости за счет работы полимерных материалов на



контактной поверхности с лопастью валковой муфты.

Рис. 2 – Конструкции вкладышей с демпфирующими элементами: а) полимерная вставка; б) пакет стальных пластин.



Рис. 3 – Конструкции вкладышей с армирующими элементами

Известны примеры успешного использования полимерного материала зарубежного производства (СВМПЭ – сверхвысокомолекулярного полиэтилена) в последних чистовых клетях стана 1700 горячей прокатки комбината им. Ильича в качестве изнашиваемых демпфирующих накладок на подушках валков для снижения горизонтальных ударов раската при захвате. Разработкой демпфирующих шпинделей повышенной податливости (угол закручивания до $180...360^{\circ}$) занимаются на кафедре ПГС и СМ ПГТУ (г. Мариуполь) с использованием полиуретановых элементов, вставляемых в тело шпинделя (материал типа СКУ–ПФЛ–100). Однако, повышенная на несколько порядков податливость шпинделей в условиях действия биений рабочих валков клетки может приводить к недопустимо высоким амплитудам крутильных колебаний в процессе прокатки заготовок, особенно в непрерывной подгруппе клеток листопркатных станов.

Предпринятые ранее отдельные попытки применения на блюмингах полимерных материалов для вкладышей скольжения показали принципиальную возможность их использования на практике, однако при этом были выявлены и некоторые проблемы. Использование полимерных материалов взамен бронзы возможно только при условии:

- качественного сырья и технологии изготовления вкладышей (литье под давлением, центробежное литье), наличие полостей приводит к разрушению не только полимерных, но и бронзовых изделий под действием ударных нагрузок;
- точного расчета напряженно–деформированного состояния вкладышей в процессе эксплуатации при наличии зазоров, преимущественно с использованием метода конечных элементов;
- точное знание максимальных динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов;
- соблюдение температурных условий эксплуатации полимерных вкладышей, что обеспечивается подачей очищенной воды, которая играет также роль смазки.

В Табл.1 приведены механические свойства полимерных материалов (капролон, фторопласт) и бронзы.

Таблица.1.Физико–механические свойства полимеров

Показатель	Капролон	Фторопласт	Бронза
1. Плотность, г/см ³	1,15 – 1,16	2,14 – 2,26	7,5 – 8,9
2. Твердость по Бринеллю, кгс /мм ²	13 – 15	3 – 4	60 – 75
3. Предел прочности, кгс /см ² , не менее			
- при растяжении	900 – 950	200 – 300	1500 – 2800
- при статич. изгибе	800	110 – 140	
- при сжатии	1000 – 1100	120	1500 – 2800
4. Относит. удлинение при разрыве, %	6 – 20	350 – 500	3 – 8
5. Ударная вязкость без надреза, кДж/м ²	120 – 150	100	100 – 160
6. Теплостойкость по Мартенсу, °С	75 – 76	110	–
7. Коэф. теплопровод., ккал/м час °С	0,23 – 0,29	0,2	60 – 80
8. Коэф. линейного расширения на 1°С при температуре от – 60°С до +50°С	5,6 – 9,8 · 10 ⁻⁵	8 – 25 · 10 ⁻⁵	1,8 · 10 ⁻⁵
9. Удельное объемное сопротивление, Ом см	10 ¹³ – 10 ¹⁴	1,0 · 10 ¹⁴	–
10. Водопоглощение, %, не более	6,0 – 7,0		–
11. Эксплуатационный диапазон температур, °С	– 50 ⁰ +110 ⁰	– 120 ⁰ +260 ⁰	–

Механические свойства капролона по сравнению с фторопластом делают его более предпочтительным материалом для металлургического

производства. На Украине выпускается модифицированный тип полиамид-6 блочный с повышенной ударной прочностью. Новая каталитическая система обеспечивает повышенную прочность, стойкость к низким температурам. Материал выпускается в виде прямоугольных плит, втулок, цилиндров и других изделий методом свободного и центробежного литья. Изделия из заготовок получают путем механической обработки. Обладает хорошими диэлектрическими и демпфирующими свойствами. Коэффициент трения по стали и бронзе со смазкой (вода, масло) – 0,04–0,08. Износ за 1000ч работы составляет 0,10 мм. Детали из капролона при наличии смазки могут работать при скоростях скольжения до 15 м/сек и удельных давлениях до 50 кгс/см². Материал нетоксичен, устойчив к воздействию углеводов, масел, бензина, спиртов, кетонов, эфиров, щелочей и слабых кислот. Не выдерживает воздействия крезолов, фенолов, концентрированных минеральных кислот, муравьиной и уксусной кислоты. Подвергается всем основным видам механической обработки на металлорежущих станках.

В настоящее время возможности применения капролона реализуются не полностью, хотя наметилась тенденция к увеличению объемов его использования. В некоторой степени это связано с традициями применения металлических узлов и деталей. Вместе с тем, возникающие проблемы износа узлов трения, их шумности и вибрации, наиболее эффективно можно решить, используя полимерные материалы. Капролон эффективно используется в течение ряда лет на ОАО «Ижорские заводы», ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения», ОАО «Череповецкий сталепрокатный завод», ОАО «Новолипецкий меткомбинат». В целом, по России и за рубежом накоплен большой положительный опыт применения капролона в металлургическом производстве. В табл.2 приведены некоторые примеры применения капролона в узлах машин и агрегатов металлургических предприятий.

Предстоящая реконструкция и модернизация металлургической отрасли в Украине должна проводиться, в т.ч. и с использованием изделий из капролона. Имеется положительный опыт его использования в цехе холодной прокатки ОАО «Запорожсталь».

Проведенные в работе [3] теоретические и лабораторные исследования позволили установить новые физические закономерности распределения давления по поверхности вкладышей шпинделей, которые уточняют известные методики расчета и проектирования вкладышей, используемые на сегодняшний день в конструкторской практике, что в первую очередь необходимо для надежной работы полимерных деталей.

Изложение основных материалов исследования.

Для проведения исследований была разработана лабораторная установка шарнира шпинделя, которая позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние вкладышей для шарнира двух конструкций:

традиционной – с сухарем и усовершенствованной – с центрирующим узлом.

Таблица 2. Применение капролона в узлах машин и агрегатов

Агрегаты и узлы	Наименование деталей
Прокатный стан 2030	Ролики накопительного устройства
Прокатные станы 350, 400, 500	Элементы сцепления опоры станин Приводные и прижимные валики Втулки, направляющие Шестерни, заглушки, диски Пальцы, сухари, полумуфты, салазки Вкладыши шпинделя
Реверсивный стан 1200	Кольца
Заготовительный стан	Втулки
Манипулятор обжимного стана	Прижимные гайки, подшипники
Машины для литья цветных металлов	Шайбы
Станки латунирования и лакирования	Червячные шестерни, редукторы
Листовальные машины	Сухари
Кран–балки, мостовые и башенные краны	Колеса и ролики Вкладыши упорных и направляющих колес Вкладыши тяговых тросов Колеса с шарикоподшипниками, обоймы
Вагонетки, тележки	Вкладыши упорных и направляющих колес Колеса, ступицы колес
Ленточные транспортеры	Ролики, подшипники барабанов

Экспериментальное исследование напряженно–деформированного состояния вкладышей при его взаимодействии с лопастью было проведено поляризационно–оптического методом с помощью моделей из фотоупругих материалов. Результатом эксперимента явились поля напряжений на контактной поверхности вкладыша с лопастью.

На основании экспериментального лабораторного исследования деформированного состояния низкомолекулярных и высокопластичных моделей вкладыша установлено, что закон изменения деформаций носит линейный характер. Результаты лабораторного исследования вкладышей послужили основой конечно–элементного анализа их напряженно–деформированного состояния, при этом деформации были заданы в качестве нагрузки. В результате установлено, что характер распределения контактных давлений, действующих на контактной поверхности вкладыша с лопастью, имеет нелинейный характер и описывается полиномиальной зависимостью:

$$\sigma(x) = a + bx^2 + cx^3,$$

где x – координата по длине вкладыша; a, b, c – коэффициенты.

Для проверки адекватности полученной полиномиальной зависимости выполнен анализ напряженно–деформированного состояния модели вкладыша конечно–элементным методом. Результаты этого исследования были сопоставлены с результатами поляризации–оптического эксперимента. Было установлено качественное совпадение картины полей напряжений, полученных в результате поляризации–оптического эксперимента, с конечно–элементным исследованием модели вкладышей, которое проявлялось в наличии линии нулевых напряжений возле проточки под головку шпинделя. Количественное сравнение результатов поляризации–оптического эксперимента и метода конечных элементов показало, что расхождение между напряжениями в теле вкладыша, определенными этими двумя методами, составляет около 10%. На Рис. 4 приведены поля напряжений в теле вкладышей.

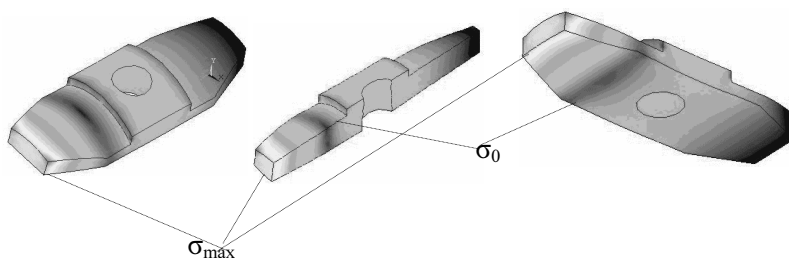


Рис. 4. Поля напряжений в теле вкладыша при нагрузке с полиномиальной зависимостью изменения давлений

Сопоставление результаты расчетов показало, что линия нулевого напряжения σ_0 , установленная по результатам поляризации–оптического эксперимента, наблюдается лишь при полиномиальном законе нагрузки вкладыша и не проявляется при линейных законах. Это подтверждает достоверность описания контактных напряжений полиномом третьей степени, в отличие от существующих методик, где применяется трапециевидный и треугольный законы нагрузок.

Предложенный полиномиальный закон распределения контактных давлений позволяет уточнить значение и плечо приложения равнодействующей силы давлений при проведении расчетов на прочность элементов универсального шпинделя. Разработанное программное обеспечение позволяет на стадии проектирования выполнять вариантные расчеты и количественную оценку напряжений для вкладышей различных конструкций.

Выводы.

1. Показана принципиальная техническая возможность применения износостойких демфирующих вкладышей для шпинделей листопркатных станов.

2. Для повышения нагрузочной способности полимерных вкладышей при выполнении расчетов необходимо знание фактических действующих нагрузок в шпинделях листопрокатных станов, а также применение конструкций с армирующими стальными элементами.
 3. Наименьшего уровня контактных напряжений в полимерных вкладышах можно добиться в конструкции шпинделя с самоцентрирующим элементом.
 4. Необходимым условием применения на практике полимерных вкладышей является применение технологии центробежного литья и точных методов расчета их напряженно–деформированного состояния, преимущественно методом конечных элементов.
1. *Разработка* и опытно–промышленное опробование предложений по уменьшению влияния зазоров в черновых клетях НТЛС 1680. Отчет по НИР / ИЧМ. № ГР 0104V005833.– Днепропетровск.– 2002. – 75с.
 2. *Аш А., Айгнер К.* Повышение эффективности эксплуатации широкополосного стана горячей прокатки благодаря использованию современных элементов привода // Черные металлы. – 2001. – №3.–С.28–36.
 3. *Нижник Н.В.* Повышение безотказности универсальных шпинделей на основе дискретно–континуальной модели главной линии рабочих клетей прокатных станов. // Дисс. к. т. н. – ДонНТУ. – Донецк. – 2005.
 4. *А.с. 1764728 СССР*, МКИ В21В35/14; Шарнир универсального шпинделя скольжения / С.И.Буряк, Ю.А.Лысенко, В.И.Руденко и др. (ДПИ).– №4110970/31; Заявл. 19.08.86; Опубл. 30.09.92, Бюл. № 36. – 8 с.: 6 ил.
 5. *Проектирование* и испытание на лабораторном стане шпинделей с резино–металлическими шарнирами для листовых и мелкосортных станов, обеспечивающих увеличение срока службы шарниров в два раза. / ИЧМ. – Днепропетровск. – Отчет НИР. – 1973, 81с.
 6. *Разработка* конструкций универсальных шарниров с резино–металлическими соединениями, обладающими вдвое большим сроком службы, чем существующие, для стана 1680 ГП завода «Запорожсталь». / ИЧМ.– Днепропетровск.– Отчет НИР.– 1971.– 69с.
 7. *А.с. 630020 СССР*, МКИ В21В35/14. Вкладыш универсального шарнира скольжения / А.Ф. Крисанов и др. (СССР).– №2339916/22–02; Заявл. 30.03.76; Опубл. 30.10.78, Бюл.№10.–3 с.: 2ил.
 8. *А.с. 1780892 СССР*, МКИ В21В35/14, F16D3/20. Шарнир универсального шпинделя / А.А. Гостев и др. (СССР).– №4914122/27. – Заявл. 27.02.91.– 1992– Бюл. №46. – 3с. – 3 ил.
 9. *А.с. 863035 СССР*, МКИ В21В35/14. Вкладыш универсального шарнира скольжения / Р.Н. Подшивалов и др. (СССР) №2707854/22–02.– Заявл. 04.01.79. – 1981.– Бюл. № 34. – 3с.– 4 ил.
 10. *А.с. 1435344 СССР*, МКИ В21В35/14. Вкладыш шарнира универсального шпинделя / С.М. Кабанец и др. (СССР) №4150206/23–02. – Заявл. 24.11.86.– 1988.– Бюл. № 41.–3с.– 3ил.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. В.И. Большаковым.