

УДК 669. 18: 621.746

*д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ткачев М. Ю.,
к.т.н. Ошовская Е. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПОДВИЖНО СОПРЯЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Приведены результаты аналитического исследования взаимного влияния кинематических и энергосиловых параметров (ускорение, сила прижатия огнеупоров, энергия удара) процесса динамического взаимодействия подвижно-сопряженных элементов переталкивающего устройства системы быстрой смены защитных огнеупоров, экранирующих струю стали от вторичного окисления на участке промежуточный ковш – кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок. Установлены регрессионные зависимости, описывающие отношения между рассматриваемыми переменными, полученными эмпирически в ходе физического моделирования соударения трех тел, одно из которых находится в заземленном (несвободном) состоянии.

***Ключевые слова:** сила, ускорение, энергия удара, физическая модель, погружной стакан, машина непрерывного литья заготовок, регрессионный анализ.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Особенностью работы систем быстрой смены погружных стаканов и стаканов-дозаторов, реализующих удаление изношенных защитных огнеупоров без прерывания разливки на МНЛЗ, является возникновение значительных динамических нагрузок. Эти системы получили широкое распространение в промышленности сравнительно недавно, поэтому ряд вопросов, связанных с их работой, не был решен до настоящего времени. Исследованием конструктивных и энергосиловых параметров систем быстрой замены погружных стаканов и стаканов-дозаторов промежуточного ковша соответственно слябовых и сортовых МНЛЗ занимался ряд ученых [1–5]. Влияние образующихся в канале сталевыпускного тракта неметаллических тугоплавких отложений на работу переталкивающего устройства системы рассмотрено в работе [6], а исследование конструктивных параметров его гидропривода раскрыто в статье [7]. При этом необходимо отметить, что авторам указанных научных трудов удалось оптимизировать конструктив-

ные параметры и получить ряд важных аналитических и эмпирических зависимостей, необходимых для проектирования указанной системы. К таким результатам следует отнести формулу для определения диаметра плунжера гидроцилиндра переталкивающего устройства, учитывающую его динамическую жесткость, математическую модель манипулятора, включающую зависимости для расчета момента сопротивления, действующего на привод механизма подачи нового стакана, и силы сопротивления, преодолеваемой приводом механизма уборки отработанного стакана. Безусловно, успехи в этой области базировались как на фундаментальных положениях общинженерных наук, так и на сравнительно недавно разработанных моделях продольного удара, полученных на основании исследований стержневых систем неоднородной структуры.

Однако до настоящего времени в отечественных и зарубежных источниках научнотехнической информации, несмотря на наличие значительного объема экспериментальных данных, отсутствуют сведения относительно взаимного влияния факторов,

определяющих работу системы, в частности, ее переталкивающего устройства.

Постановка задачи. Задачей анализа результатов ранее проведенных экспериментальных исследований энергосиловых параметров системы быстрой смены огнеупорных стаканов промежуточного ковша МНЛЗ, применяемых при серийной разливке стали, является установление регрессионных зависимостей между учитываемыми факторами.

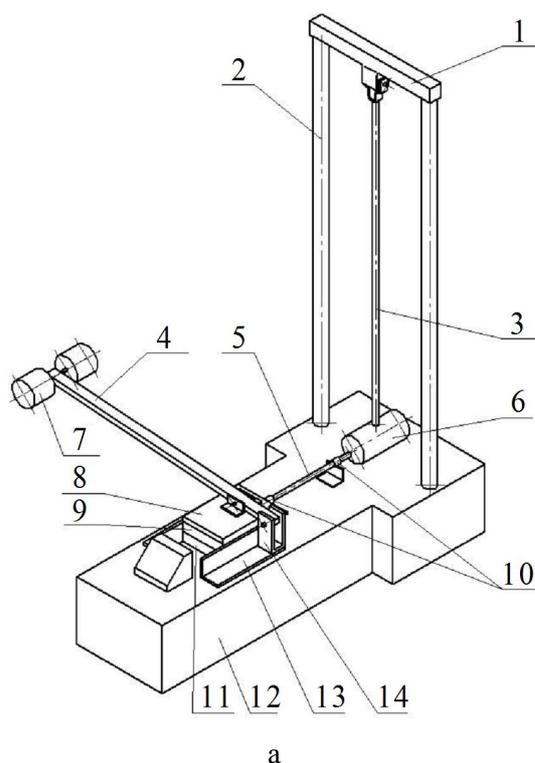
Изложение материала и его результаты. Обработанные экспериментальные данные (таблица 1) [1, 2] получены на испытательном стенде, имитирующем работу переталкивающего устройства, кон-

струкция которого защищена патентом на изобретение [3]. Устройство лабораторного стенда поясняет рисунок 1, а. В его состав входит коробчатая рама 12 с направляющими 13, между которыми размещены неподвижно закрепленная опорная плита 11 и имеющий возможность относительно продольного перемещения брусок 9, прижимаемый пластиной 8. Силу прижатия бруска 9 пластиной 8 обеспечивали комплектом грузов 7, закрепленных на большем плече рычага 4, посредством шарниров соединенного с пластиной 8 и кронштейном 14.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований энергосиловых параметров имитируемого процесса замены огнеупорных стаканов

№	Сила прижатия, Н	Ускорение, м/с ²	Энергия удара, Дж	Силы сопротивления, Н	
				Сила инерции	Суммарная сила трения
1 серия: $m_m / m_0 = 32$, $A = 8720$ кг/с					
1	1008	18	18,8	108	302
2	1008	23	28,2	138	302
3	1008	30	37,6	180	302
4	1377	25	18,8	150	413
5	1377	27	28,2	162	413
6	1377	33	37,6	178	413
7	1746	21	18,8	126	523
8	1746	24	28,2	144	523
9	1746	28	37,6	168	523
10	2116	16	18,8	96	634
11	2116	17	28,2	102	634
12	2116	18	37,6	108	634
2 серия: $m_m / m_0 = 1,6$, $A = 41250$ кг/с					
1	1008	10	18,8	100	302
2	1008	12	28,2	120	302
3	1008	15	37,6	150	302
4	1377	25	18,8	250	413
5	1377	26	28,2	260	413
6	1377	28	37,6	280	413
7	1746	24	18,8	240	523
8	1746	25	28,2	250	523
9	1746	26	37,6	260	523
10	2116	24	18,8	240	634
11	2116	25	28,2	250	634
12	2116	26	37,6	260	634



а



б

Рисунок 1 Общий вид (а) и схема (б) лабораторного стенда для исследования процесса ударного взаимодействия тел

Для создания силы принудительного перемещения бруска 9, защемленного между опорной плитой 11 и пластиной 8, служил молот 6, соединенный с нижним концом маятника 3, подвешенного на перемычке 1, которую крепили на двух вертикальных колоннах 2. Силовое взаимодействие между молотом 6 и бруском 9 осуществляли посредством промежуточного элемента 5, установленного в направляющих втулках 10.

Также в состав стенда входил контрольно-измерительный комплекс, показанный на его общем виде (рис. 1, б), включающий тензорезисторный преобразователь, двухкоординатный акселерометр ADXL 210 фирмы ANALOG DEVICES, четырехканальный усилитель переменного тока УТ4-1 (ТУ 25.06.1377-82), многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фирмы L-CARD и ЭВМ.

В ходе исследования выполняли варьирование таких параметров, как сила прижатия F_{np} огнеупорного изделия к гнездовому блоку промежуточного ковша и длительность его замены, предопределяющая ускорение a подвижно сопряженных элементов системы. В дополнение к этому проводили изменение отношения массы ударяющего тела m_m к массе ударяемого $m_б$ ($m_б = \text{const}$) и динамической жесткости промежуточного элемента A , передающего ударную нагрузку (1 серия опытов: $m_m / m_б = 32$, $A = 8720$ кг/с; 2 серия опытов: $m_m / m_б = 1,6$, $A = 41250$ кг/с). В настоящей работе не рассматривается влияние на параметры системы последнего из указанных факторов, поскольку этот вопрос подробно изучен в [6].

Статистическую обработку результатов эксперимента выполняли в несколько этапов. Среди них основными являлись: построение моделей линейной и нелинейной регрессий, определение корреляционной матрицы зависимостей между переменными (ускорение a , сила прижатия F_{np} и энергия удара E), оценка степени соответствия значений величин, наблюдаемых в ходе эксперимента и предсказанных моде-

лю. При этом в регрессиях оценивали как нормальное распределение остатков, так и удаленных остатков величин, а также их расположение относительно доверительного интервала.

Обработка данных, полученных при проведении 1-й серии опытов, позволила установить следующее.

Модель линейной регрессии имеет вид:

$$a = 22,614 - 0,0065F_{np} + 0,386E,$$

однако коэффициент корреляции при необходимом уровне значимости ($p = 0,021 < 0,05$) имеет все же недостаточно высокое значение ($R = 0,758 < 0,9$).

Модель нелинейной регрессии имеет вид:

$$a = -39,6 + 0,07F_{np} + 0,52E - 2,2 \times 10^{-5} F_{np}^2 - 0,0004F_{np}E + 0,01E^2.$$

Прогнозируемые с ее помощью значения более близки к наблюдаемым, чем при использовании модели линейной регрессии. Сумма квадратов отклонений модели нелинейной регрессии $\Delta = 62,247$, а линейной $\Delta = 141,035$, то есть в 2,3 раза больше. Коэффициент корреляции имеет достаточно высокое значение ($R = 0,948 > 0,9$) при уровне значимости $p = 0,00025 < 0,05$, поэтому можно считать данную модель нелинейной регрессии удовлетворяющей условию адекватности.

Поверхность отклика имеет форму гиперболического параболоида.

Обработка данных, полученных при проведении 2-й серии опытов, позволила установить следующее.

Модель линейной регрессии имеет вид:

$$a = 2,167 + 0,00992F_{np} + 0,386E,$$

но коэффициент корреляции имеет недостаточно значение ($R = 0,73 < 0,9$).

Модель нелинейной регрессии имеет вид:

$$a = -60,3 + 0,09F_{np} + 0,22E - 2,57 \times 10^{-5} F_{np}^2 - 0,0001F_{np}E + 0,003E^2.$$

Сумма квадратов отклонений модели нелинейной регрессии $\Delta = 63,092$, а линейной — $\Delta = 192,16$, то есть примерно в 3 раза больше. Коэффициент корреляции имеет достаточное значение ($R = 0,92 > 0,9$) при уровне значимости $p = 0,00022 < 0,05$, поэтому можно считать эту модель нелинейной регрессии также удовлетворяющей условию адекватности.

Поверхность отклика последней модели нелинейной регрессии, имеющей форму гиперболического параболоида, приведена на рисунке 2.

Также с целью дальнейшей оптимизации значений параметров системы были исследованы уравнения поверхностей второго порядка. В 2-х сериях опытов были получены практически канонические уравнения гиперболических параболоидов. В первой серии опытов это уравнение имеет вид:

$$\frac{F_{np}^2}{0,293^2} - \frac{(E-1699)}{19,54^2} = 2(a + 2320),$$

во второй –

$$\frac{F_{np}^2}{8,303^2} - \frac{E^2}{0,32^2} = 2(a - 230,2).$$

Выводы и направление дальнейших исследований.

Проверенные на адекватность модели нелинейной регрессии могут использоваться при проектировании опытно-промышленных образцов систем быстрой смены погружных огнеупорных стаканов и стаканов-дозаторов МНЛЗ.

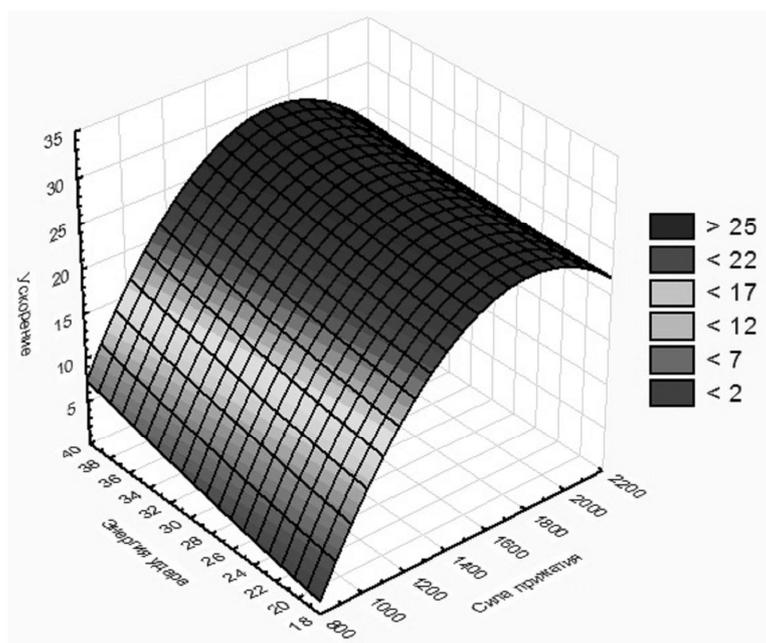


Рисунок 2 Поверхность отклика ускорения (a , м/с²) в зависимости от силы прижатия ($F_{пр}$, Н) и энергии удара (E , Дж) (модель нелинейной регрессии вида

$$a = -60,3 + 0,09F_{пр} + 0,22E - 2,57 \times 10^{-5} F_{пр}^2 - 0,0001F_{пр}E + 0,003E^2)$$

Проведенный регрессионный анализ результатов исследования энергосиловых параметров системы быстрой смены восполнил недостающие сведения в общей методике расчета систем данного класса, что будет способствовать созданию оте-

чественных конкурентоспособных образцов вспомогательного оборудования МНЛЗ, позволяющих поддерживать в стабильном режиме непрерывную разливку стали и повышать ее технико-экономические показатели.

Библиографический список

1. Еронько, С. П. Исследование характера передачи ударной нагрузки между подвижно сопряженными элементами механической системы [Текст] / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, Д. А. Яковлев, В. В. Ошовский, С. В. Мечик // *Металл и литье Украины*. — Киев, 2008. — № 6. — С. 18–22.
2. Еронько, С. П. Совершенствование системы быстрой смены погружных стаканов для серийной разливки стали на слябовых МНЛЗ [Текст] / С. П. Еронько, А. Л. Сотников, М. Ю. Ткачев // *Металлургические процессы и оборудование*. — Донецк, 2012. — № 3. — С. 26–38.
3. Пат. 74507 Україна, МПК В22D 41/56. Пристрій для заміни стакан-дозатора проміжного ковша машини безперервного лиття заготовок / Єронько С. П., Смірнов О. М., Цупрун О. Ю., Штепан С. В., Білобров Ю. М., Сусь Ю. В., Плугатарь В. С., Тіунов В. М.; заявник і патентовласник Наукове-виробниче товариство з обмеженою відповідальністю з іноземними інвестиціями «Донікс». — № 20040706155, заявл. 23.07.2004; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12. — 3 с.
4. Провоторов, Д. А. Системы автоматической замены стаканов-коллекторов на установках непрерывного литья заготовок [Текст] / Д. А. Провоторов // *Сборник материалов международной конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения»*. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2006. — С. 138–141.
5. Eron'ko, S. P. Fast Replacement of Submersible Tundish Nozzles in a Continuous Slab-Casting Machine [Text] / S. P. Eron'ko, E. V. Oshovskaya, M. Yu. Tkachev // *Steel in Translation*. — Moscow, 2016. — Vol. 46, № 1. — P. 33–38.

6. Еронько, С. П. Разработка и исследование импортозаменяющих разливочных систем промежуточных ковшей слябовых МНЛЗ [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев // Бюллетень научной и экономической информации «Черная металлургия». — Москва, 2016. — № 3. — С. 62–69.

7. Модели продольного удара [Текст]: монография / В. К. Манжосов. — Ульяновск : УлГТУ, 2006. — 160 с.

8. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры: монография [Текст] / В. К. Манжосов, В. В. Слепухин. — Ульяновск : УлГТУ, 2011. — 208 с.

9. Ткачев, М. Ю. Аналитическое исследование конструктивных параметров гидропривода переталкивающего устройства системы быстрой смены погружных стаканов слябовой МНЛЗ [Текст] / М. Ю. Ткачев, Е. В. Ошовская // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». — Алчевск, 2017. — № 5. — С. 97–102.

© Еронько С. П.

© Ткачев М. Ю.

© Ошовская Е. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А., д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 26.09.17.

**д.т.н. Еронько С. П., к.т.н. Ткачев М. Ю., к.т.н. Ошовська О. В. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)
РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ УДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ РУХОМО
СПОЛУЧЕНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ**

Наведено результати аналітичного дослідження взаємного впливу кінематичних і енергосилових параметрів (прискорення, сила притиснення вогнетривів, енергія удару) процесу динамічної взаємодії рухомо сполучених елементів перекидного пристрою системи швидкої заміни захисних вогнетривів, що екранують струмінь сталі від вторинного окислення на ділянці проміжний ківш – кристалізатор машини безперервного лиття заготовок. Встановлено регресійні залежності, що описують відносини між розглянутими змінними, що були отриманими експериментально в ході фізичного моделювання удару трьох тіл, одне з яких знаходиться в затисненому (невільному) стані.

Ключові слова: сила, прискорення, енергія удару, фізична модель, занурювальний стакан, машина безперервного лиття заготовок, регресійний аналіз.

Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P., PhD Tkachev M. Yu., PhD Oshovskaya Ye. V. (DonNTU, Donetsk, DPR)

REGRESSION ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL STUDY RESULTS ON THE IMPACT LOAD TRANSFER PROCESS BETWEEN THE MOVABLE COUPLING ELEMENTS OF THE MECHANICAL SYSTEM

There have been given the results of analytical study for interaction interference of kinematic and energy-force parameters (acceleration, pressing force of refractories, impact energy) of the dynamic interaction process between movable coupling elements of pushing device for a quick change protective refractories shielding the flow of steel after secondary oxidation at the tundish-crystallizer point of continuous casting machine. There have been found the regression dependencies describing the ratios between the studied variables obtained empirically during physical simulation of the impact of three bodies, one being in a fixed (constrained) position.

Key words: force, acceleration, impact energy, physical model, immersion nozzle, continuous casting machine, regression analysis.