

**В.П.Пиптюк¹⁾, А.Д.Малыш²⁾, С.Е.Самохвалов³⁾, С.Н.Павлов¹⁾,
С.В.Греков¹⁾, В.А.Буршитин¹⁾**

*Институт черной металлургии НАН Украины им.З.И.Некрасова¹⁾,
ГП «Научно-исследовательский трубный институт (ГП НИТИ)²⁾
Днепродзержинский государственный технический университет³⁾*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПРУГОСТИ ПОРОШКОВОЙ И СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОЛОК ДЛЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Цель исследований заключалась в экспериментальном изучении модуля упругости алюминиевой и порошкообразной проволоки в зависимости от температуры при внепечной обработке стали. Методика проведенного исследования заключалась в экспериментальном изучении модуля упругости при испытаниях образцов проволоки на растяжение на испытательной машине с экстензометром. Определено соответствие экспериментальных и литературных значений модуля упругости при комнатной ($+20^0\text{C}$) температуре для исследуемых образцов порошковой проволоки. Показана возможность использования имеющихся в литературе данных для расчета коэффициента упругости алюминиевой проволоки при температурах сталеплавильных процессов. Результаты исследований использованы при разработке программы для моделировании траектории движения алюминиевой и порошковой проволоки в объеме ковша при внепечной обработке стали.

Ключевые слова: внепечная обработка, порошковая проволока, модуль упругости

Состояние вопроса. Одним из эффективных способов внепечного рафинирования, модифицирования, микролегирования и доводки стали, является обработка порошковой и сплошного сечения проволоками (ПП). Для осуществления таких технологий используют специальное оборудование - трайб-аппараты, предназначенное для принудительного ввода ПП под уровень металла в сталеразливочный или промежуточный ковши [1].

Изучению вопросов, связанных с процессами обработки расплавов ПП посвящены работы ряда авторов. Так в публикациях [2-4] приведены результаты изучения кинетики плавления ПП и последующего усвоения продуктов плавления наполнителей расплавом в сталеразливочном ковше при одновременной продувке металла инертным газом. Авторы отмечают, что эффективность процессов обработки расплава ПП зависит от ее диаметра и скорости ввода, а также траектории движения проволоки.

В работе [5] представлена трехмерная математическая модель траектории движения ПП в процессе донной продувки металла в сталеразливочном ковше. В данной модели движение ПП в ковше моделируется набором твердых стержней одинаковой длины, сцепленных в единую систему, которые удерживаются силами упругости. При разработке модели, учитывался ряд сил, действующих на ПП. В их числе – силы тяготения,

выталкивающие силы и силы упругости ПП, которые возникают при ее изгибе и определяются потенциальной энергией:

$$U = \sum_{i=1}^N \left[gk_i m_i z_i + \frac{\kappa_i}{2} (\Delta_i - \psi_i)^2 \right] \quad (1)$$

здесь g – ускорение свободного падения; $k_i = (1 - \rho_0 / \rho_i)$, где ρ_0 и ρ_i – плотность расплава и средняя плотность i -го стержня; κ_i – коэффициент упругости в соединении $(i - 1)$ -го и i -го стержней; Δ_i – углы между ними; ψ_i – углы остаточной деформации.

Как видно из выражения (1), одной из величин, которую необходимо знать при моделировании движения ПП, является коэффициент упругости – κ_i , определяющий потенциальную энергию рассматриваемой системы. Эта величина рассчитывается на основе модуля упругости и геометрических размеров проволоки по следующему выражению [1]:

$$\kappa_i = \frac{EJ_i}{2l_i}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости 1-го рода, J – осевой (экваториальный) момент инерции поперечного сечения i -го стержня проволоки, l_i – длина i -го стержня проволоки.

Согласно выражению (2), коэффициент κ_i определяется значениями модуля упругости. В литературе имеются ограниченные данные, касающиеся величины модуля упругости некоторых материалов, полученных, в том числе, и при повышенных температурах (табл.1).

Цель настоящих исследований заключалась в экспериментальном изучении модуля упругости алюминиевой и наполненной порошкообразным силикокальцием проволок и последующий расчет величины коэффициента упругости этих ПП в зависимости от температуры.

Материалы и методика исследования. Изучение проводили на лабораторной базе ГП "НИТИ". На рис.1 представлена схема экспериментальной установки, использованной в исследованиях, которая состоит из следующих узлов:

1) универсальная испытательная машина FPZ 100/1. Погрешность измерения $\pm 1\%$;

2) экстензометр с калиброванной базой 50 мм тип 2, масштаб деформации 100:1, 200:1 и 400:1.

Шкала по усилию – 10 кН. Масштаб записи деформации – 400:1. Скорость нагружения – 1 мм/мин.

Методика проведенного исследования заключалась в следующем. Образец (1) зажимался в захваты испытательной машины FPZ 100/1 (3). На образец устанавливался датчик – экстензометр (2). После включения ус-

тановки образец растягивался со скоростью 1 мм/мин. Деформация определялась строго на участке между подвижным и неподвижным ножами экстензометра. Диаграммным аппаратом (7) фиксировались результаты измерений. После производилась расшивка диаграммы и расчет модуля упругости.

Таблица 1. Значения модуля упругости некоторых материалов при разных температурах

Материал и источник информации	Модуль упругости (МПа·10 ⁻⁴) при температуре (°C)									
	20	100	150	200	250	300	400	450	500	600
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
Армко железо [6]	21,1	20,6	-	20,0	-	19,0	18,4	-	17,5	16,3
Технически чистое железо [6]	21,7	21,4	-	20,6	-	19,7	18,8	-	-	-
Ст08 [6]	20,3	20,6	-	18,3	-	-	-	13,3	-	-
Ст20 [6]	19,8	18,4	-	17,6	-	16,7	15,8	13,4	-	-
Ст20 [7]	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Алюминий чистый (99,75%) [6]	6,82-7,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
«Д16» и «Д16П»*) [6]	6,78	6,24	5,60	5,25	4,81	4,08	-	-	-	-
АК4*) (термообработанный) [6]	7,0	6,28	-	6,09	5,80	4,91	-	-	-	-
Алюминиевый сплав*) [7]	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*) алюминийсодержащие сплавы

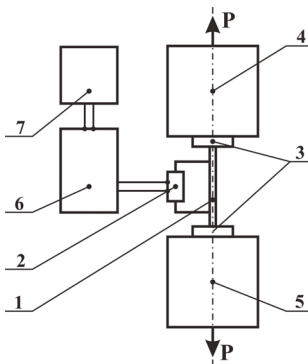


Рис.1. Схема аппаратурного оформления испытания образцов проволоки на растяжение с экстензометром. 1 – испытуемый образец; 2 – датчик экстензометра с калиброванной (50 мм) базой; 3 – захваты; 4 и 5 – верхняя и нижняя траверсы испытательной машины соответственно; 6 – усилитель сигнала; 7 – диаграммный аппарат; P – направление усилия

Исследования выполнены для 4-х образцов порошковой проволоки с силикокальцием марки СК30 и материалом оболочки из стали 08кп тол-

щиной 0,4 мм и диаметром 14 мм (фактические замеры) и 4-х образцов алюминиевой проволоки диаметром 9,7 мм (фактические замеры).

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты расшифровки диаграмм, полученных в ходе проведения экспериментов, показаны в табл.2.

Таблица 2. Результаты экспериментальной оценки модуля упругости порошковой и алюминиевой проволок

Исследуемый образец проволоки	Номер образца	Номер кривой на диаграмме	Усилие нагружения, Р, кгс (растяжение)	Абсолютное удлинение Δl , мм	Модуль упругости Е, МПа
Порошковая	1-1	4	800	0,075	197232
		5	800	0,074	200575
	1-2	2	800	0,078	190870
		3	800	0,076	193999
		4	800	0,079	187840
	1-3	2	700	0,073	178529
		3	700	0,073	178529
		4	700	0,069	188267
	1-4	2	600	0,059	188839
		3	700	0,063	207094
		4	700	0,068	191754
	Алюминиевая	2-1	2	600	0,055
3			600	0,056	70726
4			600	0,060	66305
2-2		1	400	0,035	75778
		2	500	0,048	69795
		3	500	0,043	78006
23		2	400	0,038	70726
		3	600	0,059	67716
		4	600	0,058	69188
2-4		2	600	0,060	66305
		3	600	0,056	70726
		4	600	0,054	74015

На основании полученных в настоящих исследованиях (табл.2) и приведенных в литературе данных [1,6,7] по выражению (2) рассчитаны коэффициенты упругости для исследуемых ПП (рис.2) в процессе их ввода в

ванну ковша вместимостью 350 т с помощью разработанной трехмерной математической модели [5], реализованной в программной среде DELPHI. Следует отметить, что программа расчета траектории движения проволоки автоматически разбивает ее на систему стержней, длина которых зависит от геометрических размеров ковша.

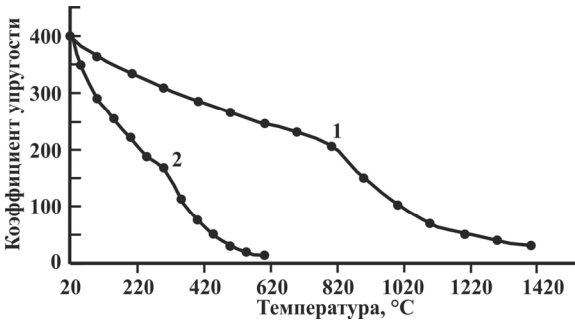


Рис.2. Графики изменения коэффициента упругости порошковой (1) и алюминиевой (2) проволоки при расчете их движения в ванне ковша вместимостью 350 т

Таким образом в работе определено соответствие экспериментальных и литературных значений модуля упругости исследуемых ПП при комнатной (+20⁰C) температуре. Показана возможность использования имеющихся в литературе данных для расчета коэффициента упругости проволок. Приведенные на рис. 2 значения коэффициентов упругости порошковой и алюминиевой проволок использованы при расчете их движения в ванне ковша вместимостью 350 т с использованием программы, реализующей математическую модель, которая описана в статье [5].

Выводы.

1. Экспериментальным методом определен модуль упругости порошковой (с силикокальцием марки СК30) и алюминиевой проволок при температуре +20⁰C, величина которого в среднем составляет $19,0 \cdot 10^4$ и $7,1 \cdot 10^4$ МПа соответственно.

2. Сопоставлением полученных экспериментальных данных о модуле упругости порошковой и алюминиевой проволок с соответствующими литературными данными для стали и алюминия показана возможность использования справочных значений исследуемого параметра для расчета коэффициентов упругости рассматриваемых изделий при температурах сталеплавильных процессов.

3. Установлено, что упругость рассмотренных изделий при температуре эксперимента определяется свойствами материала (для проволоки сплошного сечения) проволоки или материала ее оболочки (для порошковой проволоки).

4. Полученные результаты использованы в моделировании траектории движения алюминиевой и порошковой проволок в объеме ковша с приме-

ненням програми, реалізуючої відповідну математичну модель.

1. *Прецизионная* обробка металургічних расплавів / Д.А.Дюдкін, В.В.Кисиленко, І.А.Павлюченков, В.Ю.Болотов. – М.: Теплотехник, 2007. – 424 с.
2. *Исследование* процесів плавлення і траєкторії руху проволочки при введенні в сталь / В.І.Тимошпольський, В.Ю.Болотов і др. // Оф. журнал БА-ЛиМ Литьє і металургія. – 1999. – №2. – С.21–22.
3. *Математическая* модель комплексної задачі руху, плавлення і усвоєння проволочки при продувці металу в сталеразливочному ковше. / В.Ю.Болотов, І.А.Павлюченков, С.Е.Самохвалов, Г.Н.Черномаз. // Сб. науч. труд. Гос. мет. акад. Укр. (Енергетика, Металлургія). – Дн-вск. – 1999. – С.113-116.
4. *Болотов В.Ю., Самохвалов С.Е.* Комплексна задача руху, плавлення і усвоєння проволочки при продувці металу в сталеразливочному ковше. // Сб. науч. труд. ДДТУ. (Металлургія). – Дн-жинск, 1998. – с. 39-44.
5. *Вивчення* траєкторії руху дроту при введенні в металеву ванну під час продувці аргоном на установці ківш-піч. Частина 1. Математична модель / В.П.Піптюк, С.Є.Самохвалов., Р.Р.Гніп і др. // Математичне моделювання. – 2010. – №22. – С.21–24.
6. *Физические* свойства стали і сплавів використовуваних в енергетиці. Справ. под ред. Б.Е. Неймарка. – М.–Ленинград.: Энергія. – 1967. – 241 с.
7. *Испытание* матеріалів. Справ. под ред. Х.Блюменауэра. – М.: Металлургія, 1979. – 448 с.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. В.Ф.Поляковым*

***В.П.Піптюк, О.Д.Малиш, С.Є.Самохвалов, С.М.Павлов, С.В.Греков,
В.А.Буриштин***

Експериментальне вивчення коефіцієнта пружності порошкової та суцільного перетину проволочок для позапічної обробки сталі

Мета досліджень полягала в експериментальному вивченні модуля пружності алюмінієвого та порошкоподібного дротів в залежності від температури при позапічної обробці сталі. Методика проведеного дослідження полягала в експериментальному вивченні модуля пружності при випробуванні зразків дроту на розтяг на випробувальній машині з екстензометром. Визначено відповідність експериментальних і літературних значень модуля пружності при кімнатній (+20⁰С) температурі для досліджуваних зразків порошкового дроту. Показано можливість використання наявних в літературі даних для розрахунку коефіцієнта пружності алюмінієвого дроту при температурах сталеплави-льних процесів. Результати досліджень використані при розробленні програми для моделювання траєкторії руху алюмінієвого та порошкоподібного дротів при позапічної обробці сталі.