



A design analysis of the process of steel smelting in a modern steel smelting furnace is worked out, which includes calculation of furnace feed heating and smelting dynamics, material and thermal balance of the dissolution period. The calculation of choice of metal oxygen blow conditions with the view to reduce nitrogen content with application of this model.

В. В. ФИЛИППОВ, РУП "БМЗ", В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ,
С. А. ФОМЕНКО, БГА, А. Д. ШЕВЧЕНКО, В. В. ЭНДЕРС, РУП "БМЗ"

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И ВЫБОР РЕЖИМОВ ПРОДУВКИ КИСЛОРОДОМ КОРДОВЫХ МАРОК СТАЛЕЙ С ЦЕЛЮ УМЕНЬШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА

УДК 669.187.26.001.57

Современная металлургическая промышленность требует повышения надежности и производительности действующего производственного оборудования, снижения материало- и энергоемкости металлопродукции, а также улучшения ее качества. Результатом выполнения этих требований должно стать конструктивное и теплотехнологическое усовершенствование этого оборудования и разработка рациональных режимов его работы. В настоящее время одним из способов разработки рациональных режимов работы теплотехнологического оборудования является математическое моделирование.

Кордовые и высококачественные марки стали в условиях Белорусского металлургического завода выплавляются в сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП №3 с последующей доводкой на установках внепечной обработки металла (установка "печь—ковш", вакууматор RH или VD) и разливкой на машине непрерывного литья заготовок сечением 250×300 и 300×400 мм.

Электродуговая сталеплавильная печь №3 Белорусского металлургического завода введена в эксплуатацию по проекту фирмы "Фёст-Альпине" в 1989 г. В 1998 г. по контракту с фирмой "Фёст-Альпине" проведена ее модернизация. Печь оборудована трансформатором мощностью 75 МВА, а также оснащена системой эркерного выпуска металла, донной продувкой металла инертными газами, тремя стеновыми и дверной газокислородными горелками. Продувка металла кислородом осуществляется через водоохлаждаемую непогружную фурму "Mark-4" с интенсивностью 1800—2400 м³/ч и через эркерную комбинированную фурму (КФ) с интенсивностью 1200—1500 м³/ч. Одновременно с продувкой металла кислородом в печь вдуваются порошкообразные углеродсодержащие материалы для наведения пенистого шлака.

После проведения заводом ряда реконструктивных и технологических мероприятий на ДСП №3 представляется необходимым дополнительное исследование технологии выплавки с составлением полного теплового и материального балансов и анализ динамики плавления шихты. Также одной из важнейших проблем при получении качественной кордовой стали является минимизация в ней содержания азота. Решение этих задач проведено с использованием средств математического моделирования и статистического анализа.

Процесс выплавки стали как объект математического моделирования представляет собой сложную систему, в которой действуют процессы, подчиняющиеся законам термодинамики, тепло- и массопереноса, гидродинамики, кинетики и т.д. Поэтому его целесообразно разбить на следующие блоки, т.е. произвести его декомпозицию на ряд простых составляющих:

- 1) расчет динамики нагрева и плавления шихты;
- 2) материальный баланс периода расплавления;
- 3) тепловой баланс периода расплавления;
- 4) расчет потребного количества кислорода для поддержания заданной температуры стали в период ее кипа при отключенных дугах.

Расчет динамики нагрева и плавления шихты. Основным уравнением расчета динамики нагрева и плавления шихты является двумерное уравнение теплопроводности с источниками теплоты [1]:

$$c_{эф}(t, r, z) \rho(r, z) \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(t, r, z) \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(t, r, z) \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial z} \right] + Q_{ЭКЗ} + Q_{КОНВ}. \quad (1)$$

Выделение теплоты фазового перехода в интервале температур ликвидус—солидус учитывали путем введения эффективной теплоемкости:

$$c_{эф}(t, r, z) = \begin{cases} c_T & \text{при } t < t_s, \\ c_T + \frac{Q}{t_1 - t_s} & \text{при } t_s \leq t \leq t_1, \\ c_ж & \text{при } t > t_1, \end{cases} \quad (2)$$

где c_T и $c_ж$ — удельная теплоемкость твердой и жидкой фаз металла; Q — теплота фазового перехода в интервале температур ликвидуса t_1 и солидуса t_s .

Коэффициент теплопроводности $\lambda(t, r, z)$ для шихты определяем по формуле:

$$\lambda(t, r, z) = \lambda_T \frac{\rho}{\rho_T} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_T}\right) \left[\alpha_v + 4\varepsilon\sigma_0\delta(t + 273)^3\right], \quad (3)$$

где ρ — насыпная плотность лома или окатышей; ρ_T , λ_T — соответственно плотность и теплопроводность твердого металла; σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана; δ — среднее расстояние между центрами кусков; α_v — объемный коэффициент теплопередачи.

В жидкой фазе ("болото") шихты коэффициент теплопроводности принимает значение λ_T при температуре ниже температуры ликвидуса металла и значение $\lambda_ж$ при температуре "болота" выше температуры ликвидуса. Плотность материалов $\rho(r, z)$ может принимать значения насыпной плотности лома (ρ_n), окатышей (ρ_o), твердой (ρ_T) и жидкой ($\rho_ж$) фаз "болота".

Подогрев "болота" за счет выделяющейся теплоты экзотермических реакций учитывали введением в уравнение (1) источникового члена $Q_{экс}$, который принимает постоянное значение после 10-й минуты процесса подогрева и плавления шихты. Дополнительный подогрев шихты печными газами учитывали как источниковый член в уравнении (1):

$$Q_{конв} = \alpha_v(t_r - t(r, z, \tau)). \quad (4)$$

Температуру печных газов $t_r(r, z, \tau)$ принимали равной температуре поверхностных слоев жидкой фазы шихты.

Граничные условия.

Вдоль оси симметрии печи тепловой поток равен нулю:

$$\frac{\partial t(0, z, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (5)$$

на верхней поверхности шихты, вдоль боковой стенки печи и дна теплообмен происходит в результате конвекции:

$$-\lambda(t, r, z) \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial n_i} = \alpha_i(t(r, z, \tau) - t_{\phi}). \quad (6)$$

Здесь n_i — нормаль к соответствующим поверхностям шихты; α_i — коэффициент теплоотдачи, принимающий значения α_v (верхняя поверхность шихты), α_c (стенка печи) и α_d (дно печи).

При массе жидкой фазы, не превышающей 30 т, в зоне пятна дуги на поверхности жидкого металла задавали лучистый теплообмен:

$$-\lambda(t, r, z) \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial n_i} = \varepsilon_m \sigma_0 \left[(t_d + 273)^4 + (t(r, z, \tau) + 273)^4 \right], \quad (7)$$

где ε_m — степень черноты поверхности металла; t_d — температура дуги, °С.

Численное решение физико-химической модели динамики нагрева и плавления шихты (1)–(7) осуществляли методом контрольного объема, так как дискретный аналог решения задач тепломассо-переноса, полученный методом контрольного объема, имеет наибольшую точность аппроксимации исходных уравнений разностными операторами и устойчивость численных схем. При постановке данной физико-химической модели были использованы следующие условия.

1. При завалке с "болотом" растворяется часть шихты (чугун и лом) и температура "болота" на 15°С выше температуры солидуса металла.

2. Объем шихты вычисляется исходя из начального теплосодержания "болота" и его возможности растворить (довести до температуры $t_s^6 + 15^\circ\text{C}$) определенную часть шихты и шихты, равной по объему проплавленным колодцам.

3. Первоначальный объем завалки состоит из объема "кашицы", объема шлака (остаточного) и объема остальной шихты (известняк, нерастворившиеся остатки лома и чугуна, окатыши).

4. Общая масса первоначальной завалки составляет 60% от массы в конце периода расплавления.

5. Расчет производится только на период расплавления начиная с момента начала подвалки, т.е. после проплавления колодцев. Диаметр колодца составляет $1,3d$ (d — диаметр электрода).

При проведении расчетов учтено:

- изменение уровня расплавленного металла;
- изменение верхнего уровня шихты в зависимости от скорости подвалки;
- изменение толщины слоев шихты с различными плотностями;
- пятно дуги постоянное и расположено всегда на уровне зеркала жидкого металла;
- мощность источника постоянная и включает в себя суммарное воздействие энергии дуг, теплового эффекта экзотермических реакций и теплоты от воздействия продувки кислородом.

Тепловой баланс. Для ДСП как агрегата периодического действия энергетический баланс энергии для периода расплавления имеет вид [2, 3]

$$W_c = W_{\text{пол}} + \sum W_{\text{т.п}} + \sum W_{\text{э.п}}, \quad (8)$$

где W_c — расход электрической энергии, поступающей из электрической сети; $W_{\text{пол}}$ — полезная энергия, расходуемая на изменение энтальпии выплавленной стали и электропечного шлака, на компенсацию энергетических затрат эндотермических технологических процессов за вычетом теплового эффекта возможных экзотермических процессов в ванне ДСП; $\sum W_{\text{т.п}}$ — сумма тепловых потерь с теплоотдающей поверхности ДСП, излучением через отверстия, в виде физического тепла охлаждающей воды и выделяющихся газов за вычетом теплового эффекта возможных химических реакций в свободном пространстве ДСП (окисление графитовых электродов, применение ТКГ и т.п.); $\sum W_{\text{э.п}}$ — сумма электрических потерь в результате диссипации электрической энергии при преобразовании в электропечном трансформаторе и при передаче по вторичному токопроводу ДСП.

В случае известного электрического к.п.д. $\eta_{\text{э}}$ составление энергетического баланса ограничивают статьями теплового баланса :

$$W_c \eta_{\text{э}} = W_{\text{пол}} + \sum W_{\text{т.п}}. \quad (9)$$

Энергетический баланс ДСП составлен с учетом результата расчетов материального баланса технологического процесса выплавки заданной марки стали.

Расчет потребного количества кислорода для поддержания заданной температуры стали в период ее кипа при отключенных дугах произведен исходя:

- из тепловых потерь (потери тепла теплопроводностью, потери тепла с газообразными продуктами реакций) за время отключения электрических дуг;
- из того, что основным источником дополнительной энергии является окисление углерода.

Вне зависимости от того, растворяется ли предварительно углерод в металле или просто сгорает в атмосфере печи, выделяемая при этом энергия зависит от соотношения CO и CO_2 в газообразных продуктах реакций. В расчетах принимается, что 30% углерода окисляется до CO_2 , а 70% окисляется до CO .

В работе [4] указывается на существование прямолинейной зависимости между выгоревшим углеродом $\Delta[\text{C}]$ и содержанием углерода $\Delta[\text{N}, \%]$. В определенных условиях при небольших изменениях $[\text{N}]$ характер интересующей нас зависимости с определенным приближением может быть представлен уравнением:

$$\lg \frac{[\text{N}]}{[\text{N}]_0} = -k([\text{C}]_0 - [\text{C}]), \quad (10)$$

т. е. логарифм относительного изменения концентрации $[\text{N}]$ пропорционален количеству выгоревшего углерода. На основании этого и расчетного количества выгоревшего углерода за время подачи кислорода при отключенных дугах определили изменение содержания азота за данный период.

По данным расчета потребного количества кислорода для поддержания заданной температуры стали в период ее кипа при отключенных дугах производится уточненный расчет теплового баланса периода расплавления и выводится полный протокол расчета периода расплавления.

В качестве примера приведем расчетные данные периода расплавления при выплавке кордовой стали 70К в условиях РУП "БМЗ" (табл. 1—4). Исходные данные для расчета взяты на примере плавки № 30382.

Уточненный тепловой баланс периода расплавления в ДСП при использовании кислорода для поддержания заданной температуры стали в период ее кипа при отключенных дугах представлен в табл. 3.

Для этих же данных были выполнены расчеты потребного количества кислорода для поддержания заданной температуры стали в период ее кипа при отключенных дугах для разных промежутков времени отключения (табл. 4).

Произведенная параметрическая настройка модели показала хорошую сходимость расчетных и производственных данных, что свидетельствует о ее надежности и корректности. Так, для данной плавки (№ 30382) имеем следующие значения расчетных и производственных показателей: расход

Таблица 1. Материальный баланс периода расплавления в ДСП (на 100 кг шихты)

Поступило	кг	Получено	кг		
Окатыши	30,92	Металл	95,74		
Чугун переделный	14,44	Шлак	14,74		
Пакеты ВАЗ	40,09	Выделяющиеся газы	14,40		
Лом	0,00	Потери металла со шлаком	0,50		
Бой электродный	0,00	Fe ₂ O ₃ (в дым)	3,43		
Магnezит	0,00				
Кокс	0,02				
Известь	6,00				
Футеровка	2,30				
Электроды	0,30				
Остаточный шлак	5,37				
Болото	14,55				
Природный газ	0,34				
Кислород	3,52				
Воздух	11,34				
ВСЕГО	129,18			ВСЕГО	128,81
				Невязка 0,29 %	

Таблица 2. Тепловой баланс периода расплавления в ДСП

Статья прихода	ГДж	%	Статья расхода	ГДж	%	
Тепло, вносимое шихтой	0,92	0,32	Физическое тепло стали	140,30	48,34	
			Физическое тепло стали, теряемое со шлаком	0,74	0,26	
Тепло, вносимое электрическими дугами	184,63	63,61	Физическое тепло шлака	34,40	11,85	
			Тепло уходящих газов (ВСЕГО)	25,89	8,92	
Тепло ТКГ	17,19	5,92	в том числе:			
Тепло экзотермических реакций	53,42	18,41		продукты реакций	13,33	4,59
				продукты горения газа	12,56	4,33
Тепло шлакообразования	4,79	1,65	Тепло, уносимое частицами Fe ₂ O ₃	7,04	2,43	
Тепло, вносимое "болотом"	29,31	10,10	Потери тепла через ОК (ВСЕГО)	52,55	18,11	
			в том числе:			
				малый свод	0,05	0,02
				подину печи	0,88	0,30
				боковые панели	22,85	7,87
				свод комбинированный	22,85	7,87
				рабочее окно	5,93	2,04
			Потери тепла в период межплавочного простоя	0,00	0,00	
			Тепло остаточного "болота"	29,31	10,10	
ВСЕГО	290,25	100,00	ВСЕГО	290,25	100,00	

**Таблица 3. Тепловой баланс периода расплавления в ДСП
(при поддержании заданной температуры стали в период ее кипа для времени отключения дуг на 3 мин)**

Статья прихода	ГДж	%	Статья расхода	ГДж	%
Тепло, вносимое шихтой	0,92	0,31	Физическое тепло стали	140,30	47,75
Тепло, вносимое электрическими дугами	184,63	62,83	Физическое тепло стали, теряемое со шлаком	0,74	0,25
			Физическое тепло шлака	34,40	11,71
Тепло ТКГ	17,19	5,85	Тепло уходящих газов (ВСЕГО)	26,62	9,06
Тепло экзотермических реакций	57,01	19,40	в том числе:		
Тепло шлакообразования	4,79	1,63	продукты реакций	14,06	4,78
			продукты горения газа	12,56	4,27
Тепло, вносимое "болотом"	29,31	9,97	Тепло, уносимое частицами Fe ₂ O ₃	7,04	2,40
			Потери тепла через ОК (ВСЕГО)	55,41	18,86
			в том числе:		
			малый свод	0,05	0,02
			подину печи	0,93	0,31
			боковые панели	24,10	8,20
			свод комбинированный	24,10	8,20
			рабочее окно	6,25	2,13
			Потери тепла в период межплавочного простоя	0,00	0,00
			Тепло остаточного "болота"	29,31	9,97
ВСЕГО	293,84	100,00	ВСЕГО	293,84	100,00

Таблица 4. Расчетные данные потребного количества кислорода, расхода углерода и содержания азота при различном времени отключения дуг

Время, мин	3	5	7	10
Потребное количество кислорода, м ³	248	413	578	826
Расход углерода, кг	204	341	477	681
Содержание азота перед началом продувки, ppm	40	40	40	40
Содержание азота после продувки, ppm	38,9	38,3	37,6	36,6

электроэнергии — 56 984 и 55 383 кВт·ч (расхождение — 2,8%); время под током — 55,1 и 55 мин (0,2%); выход годного — 95,74 и 93,37% (2,5%).

С целью определения возможного снижения азота на основе этой модели была получена зависимость скорости удаления азота от его начального содержания. При этом принимали, что концентрация углерода в металлической ванне выше критической и скорость окисления углерода постоянна.

Зависимость скорости деазотации металла от начального содержания азота приведена на рис. 1.

При содержании азота в кордовой стали в конце плавки в пределах 30—40 ppm скорость деазотации металла составила 0,3—0,5 ppm/мин. Максимальное удаление азота при этом составит не более 2 ppm (0,0002%) (при продолжительности периода отключения электрических дуг не более 3 мин).

Из полученных результатов можно сделать вывод о нецелесообразности проводить отключение электрических дуг в конце плавки для удаления азота.

Для минимизации содержания азота при выплавке кордовой стали необходимо оптимизировать режимы продувки металла кислородом и содержание углерода перед выпуском.

Выбор режимов продувки металла кислородом с целью минимизации содержания азота. Для решения данной задачи проведен статистический анализ содержания азота перед выпуском от способов продувки кислородом и технологических параметров плавок в зависимости от содержания углерода в печи перед выпуском и способов продувки металлической ванны кислородом.

Сравнительные технологические параметры плавок в зависимости от содержания углерода перед выпуском приведены в табл. 5.

Таблица 5. Сравнительные технологические параметры плавов

Содержание углерода в печи перед выпуском	Пакеты ВАЗ, т	Чугун, т	Окалыши, т	Итого, т	Время под током, мин	Электроэнергия, кВт·ч	[C] _{кон} в печи, %	[N] _{кон} в печи, %	Расход углерода (фурма), кг	Удельный расход кислорода, м ³ /т
[C] _{кон} <0,1%	54	21	43	118	62	59196	0,07	0,0039	288	16,8
[C] _{кон} >0,1%	55	21	42	117	61	59034	0,18	0,0037	299	13,6

Таблица 6. Содержание азота в металле при выплавке кордовой стали в зависимости от различных способов продувки ванны

Режим	Кол-во плавов	Период времени	Способ продувки металлической ванны кислородом	[N] _{кон} %
I	37	30.03. – 12.04.1999 г.	Фурма-манипулятор «Mark-4» с интенсивностью 2400 м ³ /ч	0,0042
II	32	29.07. – 01.08.1999 г.	Фурма-манипулятор «Mark-4» с интенсивностью 1800 м ³ /ч	0,0038
III	33	31.03. – 03.04.2000 г.	Фурма-манипулятор «Mark-4» с интенсивностью 2400 м ³ /ч+эркерная комбинированная фурма MPL	0,0044
IV	31	07.05. – 13.05.2000 г.	Фурма-манипулятор «Mark-4» с интенсивностью 1800 м ³ /ч+эркерная комбинированная фурма MPL	0,0033

Из данных таблицы следует, что при среднем увеличении конечного содержания углерода от 0,07 до 0,18% происходят следующие изменения технологических параметров при одинаковой шихтовке плавов:

- время под током сократилось на 1 мин;
- удельный расход кислорода на обезуглероживание металла сократился на 3,2 м³/т;
- содержание азота снизилось на 0,0002%.

Конечное содержание азота в металле при выплавке кордовой стали в зависимости от различных способов продувки ванны приведено в табл. 6.

Как видно из таблицы, оптимальными режимами продувки ванны кислородом с целью минимизации конечного содержания азота являются режимы II и IV. Для данных режимов построены эмпирические графики зависимости относительного изменения концентрации [N] от количества выгоревшего углерода (рис. 2).

$\lg (V_{\Delta}[N], \text{ppm}/\text{мин})$

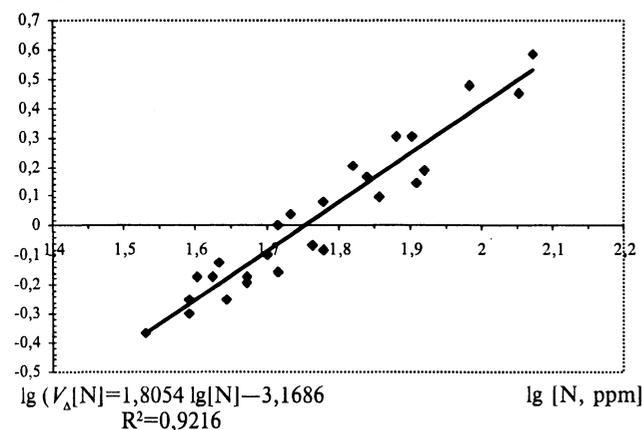


Рис. 1. Зависимость скорости деазотации от содержания азота

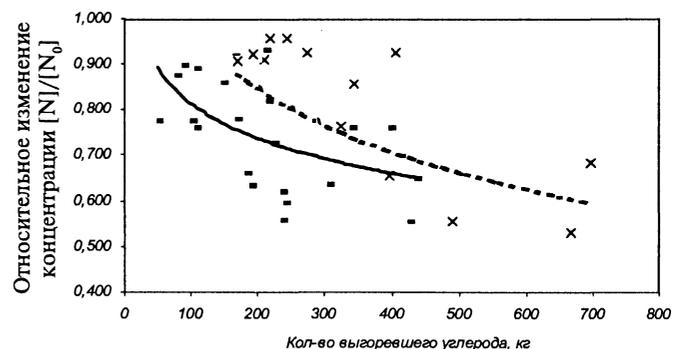


Рис. 2. Зависимость относительного изменения концентрации [N] от количества выгоревшего углерода: — ФМ (1800 м³/ч)+ЭФ; - - - ФМ (1800 м³/ч)

Выводы

1. Разработанная модель включает в себя полный расчет теплового и материального балансов, при этом возможен качественный и количественный анализ приходных и расходных статей при изменении состава шихты, и следовательно, анализ энерго-, топливо- и материалопотребления при выплавке стали.

2. Нецелесообразно проводить отключение электрических дуг в конце плавки для удаления азота.
3. Выпуск металла производить с содержанием углерода не менее 0,2%.
4. Для ДСП №3 РУП "БМЗ" оптимальными режимами продувки ванны металла кислородом с целью конечной минимизации азота являются продувка фурмой-манипулятором "Mark-4" с интенсивностью 1800 м³/ч + эркерная комбинированная фурма MPL или фурма-манипулятор "Mark-4" с интенсивностью 1800 м³/ч.

Литература

1. Тимош польский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Наука і тэхніка, 1995.



ПРОДУКЦИЯ МЕТИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКА СТАЛЬНАЯ

Наименование продукции	Сортамент	Марка стали	НТД на продукцию (основной НТД)
Проволока стальная сварочная	Ø 3,0; 4,0; 5,0	Св-08ГА Св-08ГС	ТУ РБ 04778771.009-93
Проволока стальная омедненная сварочная	Ø 0,8; 1,0; 1,2; 1,6;	Св-08Г1С Св-08ГС	ТУ РБ 04778771.007-94
	Ø 1,2; 1,6	Св-08Г2С	ТУ РБ 04778771.007-94
Проволока стальная углеродистая пружинная	Ø 0,8 – 5,0	70П, 75П, 80П	ТУ РБ 04778771.008-94
Проволока арматурная низкоуглеродистая	Ø 3,0; 4,0; 5,0	тЗсп	ТУ РБ 04778771.006-95
Проволока стальная углеродистая для сеток	Ø 1,20–3,15	45, 50, 55	ТУ РБ 04778771.016-2000
Проволока для изготовления скоб	Ø 1,0; 1,2; 1,5; 1,8	35	ТУ РБ 04778771.018-2000
Проволока стальная для изготовления гвоздей	Ø 2,50; 3,0; 3,5; 4,0	0,2сп, 3сп	ТУ РБ 04778771.028-96
Проволока стальная оцинкованная для мюзле	Ø 1,0	т1сп	ТУ РБ 04778771.051-98
Проволока стальная пищевая	Ø 2,0; 2,65; 3,0; 3,5	35,40,45	ТУ РБ 04778771.012-098
Проволока стальная низкоуглеродистая общего назначения	Ø 1,0; 1,50; 2,20; 2,50; 3,0	1сп, 3сп, 10	ГОСТ 3282