

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals

Научная статья
УДК 669.187.56
DOI: 10.14529/met250302

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТЕПЕНЬ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАРОК СТАЛИ

Е.И. Ищук^{1, 2}✉, А.А. Грицюк^{2, 3}

¹ Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия

² ООО «НПО Лаборатория специальных сталей и сплавов», Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ jenyashuk@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается влияние увеличения скорости электрошлакового переплава на качество и свойство получаемого металла. Исследование фокусируется на изменении механических характеристик металлопроката и уровня загрязнённости стали неметаллическими включениями при различных скоростях переплава. Анализируются экспериментальные данные, полученные при переплавах конструкционных марок стали, а также делаются выводы о возможных преимуществах и недостатках увеличения скорости процесса. Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации технологических параметров электрошлакового переплава в металлургической промышленности.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав (ЭШП), расходуемый электрод, скорость переплава, механические свойства, неметаллические включения, металлопрокат, производительность, конструкционные марки стали

Для цитирования: Ищук Е.И., Грицюк А.А. Анализ влияния скорости электрошлакового переплава на механические свойства и степень загрязнённости неметаллическими включениями конструкционных марок стали // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 3. С. 21–28. DOI: 10.14529/met250302

Original article
DOI: 10.14529/met250302

ANALYZING THE INFLUENCE OF ELECTROSLAG REMELTING SPEED ON MECHANICAL PROPERTIES AND DEGREE OF CONTAMINATION WITH NON-METALLIC INCLUSIONS OF STRUCTURAL STEEL GRADES

E.I. Ishchuk^{1, 2}✉, A.A. Gritsiuk^{2, 3}

¹ Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

² LLC "NPO Laboratory of special steels and alloys", St. Petersburg, Russia

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ jenyashuk@gmail.com

Abstract. The article deals with the influence of increasing the electroslag remelting speed on the quality and properties of the produced metal. The study focuses on the changes in the mechanical characteristics of rolled products and the level of contamination of steel with non-metallic inclusions at different remelting speeds. Experimental data obtained during remeltings of a structural steel grades are analyzed,

© Ищук Е.И., Грицюк А.А., 2025

and conclusions are drawn about possible advantages and disadvantages of increasing the process speed. The results of the study can be useful for optimization of technological parameters of electroslag remelting in the metallurgical industry.

Keywords: electroslag remelting (ESR), consumable electrode, melting rate, mechanical properties, non-metallic inclusions, rolled metal, productivity, structural steel grades

For citation: Ishchuk E.I., Gritsiuk A.A. Analyzing the influence of electroslag remelting speed on mechanical properties and degree of contamination with non-metallic inclusions of structural steel grades. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(3):21–28. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250302

Современные тенденции развития техники и технологии во многих отраслях промышленности обуславливают повышение требований к качеству и чистоте вовлекаемых металлических конструкций и изделий, что, в свою очередь, приводит производителей металлургического сектора к необходимости реализации ряда технических и технологических мероприятий. Для повышения качества производимой продукции металлургии могут прибегать к изменению состава и качества вовлекаемых материалов, внедрению дополнительных способов обработки металла: вакуумная дегазация при внепечной обработке, рафинирующие переплавы и пр.

Среди отечественных и зарубежных предприятий чёрной металлургии широкое распространение приобрели электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплавы как способы значительного повышения качества производимых сталей, по сравнению с методами открытой выплавки. Электрошлаковый переплав (ЭШП) является эффективным способом снижения вредных примесей в стали, содержания неметаллических включений, а также позволяет формировать направленную структуру стальных слитков, что в целом приводит к значительному повышению качества металла и его механических свойств.

В качестве исходного материала при ЭШП обычно применяют расходуемые электроды (РЭ) из первичного металла, который может быть изготовлен литьем, прессованием или сваркой кусковых материалов. Расходуемый электрод плавится в шлаковой ванне за счёт выделения тепла при прохождении электрического тока через неё. Кроме того, шлаковая ванна является рафинировочной средой для снижения содержания вредных примесей и неметаллических включений.

На качество рафинирования стали и структуру получаемого электрошлакового слитка влияет состав и количество шлака, а также электрический режим и скорость наплавления

металла (скорость переплава). Установлено, что скорость подачи расходуемого электрода оказывает существенное влияние на электрический режим процесса плавки, с увеличением скорости подачи электрода растёт и величина тока, протекающего через ванну жидкого шлака [1, 2].

Изменение скорости наплавления слитка влияет не только на макро-, но и на микроструктуру: расстояние между осями дендритов, микросегрегацию, величину и форму НВ. Достижение оптимальных результатов по этим показателям представляет собой важную задачу и является основным преимуществом процесса ЭШП [3].

Скорость переплава расходуемого электрода при ЭШП ограничена как по нижнему, так и по верхнему пределу для каждого конкретного случая. При слишком низкой скорости ухудшаются показатели энергетической эффективности процесса и качества поверхности слитка [4]. В свою очередь при высокой скорости плавления образуется глубокая металлическая ванна, ухудшающая условия кристаллизации металла и показатели его загрязнённости. Вследствие этого актуальной задачей является подбор оптимальной скорости электрошлакового переплава для обеспечения баланса между эксплуатационными свойствами стали и качеством поверхности электрошлакового слитка [5, 6].

В данной работе проведен анализ влияния изменения скорости электрошлакового переплава расходуемых электродов из конструкционной хромоникельмолибденовой марки стали (ГОСТ 4543) на получаемые значения параметров механических свойств проката, а также на степень загрязнённости стали неметаллическими включениями.

Результаты проделанной работы

Опытные работы проводились в цехе спецметаллургии предприятия ООО «НПО Лаборатория специальных сталей и сплавов»

(г. Санкт-Петербург), в состав сталеплавильного комплекса которого входит дуговая сталеплавильная печь (ДСП) номинальной ёмкостью 8 т, агрегат ковш-печь (АКП), установка для вакуумирования стали (УВС), а также участок электрошлакового переплава с установкой ЭШП-4.

Весь объём работ проведен при производстве слитков ЭШП из типовой хромоникельмолибденовой конструкционной марки стали.

Процесс изготовления расходоуемых электродов из конструкционной марки стали проходил по следующей схеме: выплавка с окислением в ДСП, внепечная обработка стали на агрегате ковш-печь, вакуумная дегазация на УВС и сифонная разливка в слитки – расходоуемые электроды круглого сечения массой 4,3 т.

Электрошлаковый переплав проводили на установке ЭШП-4, оборудованной колпаком для переплава в атмосфере защитного газа – аргона, с использованием флюса тройной системы $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$. Переплав расходоуемых электродов проводился в кристаллизаторе квадратного сечения ($\square 500$ мм). Следует отметить, что различие в формах сечений РЭ и кристаллизатора может приводить к неравномерному распределению тепла, что, в свою очередь, может неблагоприятно сказаться на формировании структуры или качества поверхности слитка.

На момент запуска предприятия в 2020 году компанией-производителем ЭШП INTECO (Австрия) была внедрена базовая технология, в которой для расчёта оптимальной скорости переплава использовалась формула (1) и коэффициент скорости переплава k , равный 1,0–1,1 [7]:

$$V = k \cdot d_{\text{эл}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент скорости переплава; $d_{\text{эл}}$ – диаметр электрода.

Задаваемые параметры по скорости переплава (V) заносятся в автоматическую систему управления установки ЭШП, процесс ведётся в автоматическом режиме, при котором обеспечивается постоянство скорости наплавления слитка и за счёт контроллера погружения обеспечивается поддержание заданного заглубления расходоуемого электрода в шлаковую ванну.

В процессе опытно-промышленных испытаний установки ЭШП подбирались такие электрические режимы переплава, при кото-

рых выполнялось условие по скорости переплава $V_0 = 1,1 \cdot d_{\text{эл}}$, или $k_0 = 1,1$. При применении коэффициента $k_0 = 1,1$ были получены неудовлетворительные результаты с образованием локальных (на рёбрах) или кольцевых пережимов на слитках.

На основании полученных результатов было принято решение о поэтапном увеличении скорости переплава конструкционных марок стали. Значение коэффициента скорости переплава было увеличено сперва до $k_1 = 1,2$, затем до $k_2 = 1,35$. Результатом поэтапного увеличения скорости переплава (V_1 и V_2) стало обеспечение гладкой поверхности слитков с сохранением исходного высокого уровня служебных свойств макро- и микроструктуры металла.

В ходе промышленной эксплуатации установки ЭШП в связи с повышенным спросом на металл электрошлакового переплава закономерным встал вопрос о повышении производительности участка ЭШП. С целью определения изменения свойств получаемой металлопродукции при повышении скорости переплава при ЭШП разработали программу поэтапного повышения скорости переплава конструкционных марок стали. Выполненная работа заключалась в двухэтапном повышении производительности с промежуточной оценкой качества металлопродукции (после сортовой прокатки), а также предполагала проведение по каждому этапу восьми опытных электрошлаковых переплавов, в которых изменяли коэффициент скорости:

1) с $k_1 = 1,2$ на $k_2 = 1,35$ ($V_1 \rightarrow V_2$);

2) с $k_2 = 1,35$ на $k_3 = 1,45$ ($V_2 \rightarrow V_3$).

Результаты контроля качества получаемой металлопродукции, производимой из слитков ЭШП, первого этапа повышения производительности показали отсутствие заметного изменения пластических и прочностных свойств металла. Также не выявлено существенного изменения в макро- и микроструктуре металлопроката, содержании неметаллических включений. При этом снижение продолжительности переплава конструкционных марок стали составило 7,4 %. Достигнутая скорость $V_3 = 1,35 \cdot d_{\text{эл}}$ электрошлакового переплава конструкционных марок стали была внедрена в серийное производство.

Ко второму этапу повышения производительности установки ЭШП и переходу на скорость $V_3 = 1,45 \cdot d_{\text{эл}}$, было проведено достаточное количество переплавов для оценки

стабильности внедрённых изменений и набора статистических данных.

В ходе выполнения второго этапа опытной работы были выбраны и переплавлены 8 расходоуемых электродов четырёх исходных плавок. Из полученных слитков ЭШП был произведён сортовой металлопрокат круглого сечения диаметром от 53 до 60 мм (после механической обработки).

Сравнение изменения значений производственных параметров выполнено с массивом данных по 66 переплавам аналогичных марок стали при скорости V_2 . Данные по продолжительности процесса опытных плавок (V_3), а также усреднённые показатели сравнительных плавок со скоростью переплава V_2 приведены в табл. 1.

Исходя из представленных в табл. 1 результатов, можно сделать вывод о сокращении длительности процесса в среднем на 39 мин

(снижение общей продолжительности на 8,4 %). Также отмечено снижение расхода электроэнергии на 5 % на плавках, проводимых с повышенной скоростью переплава.

Для оценки макроструктуры и механических свойств были отобраны пробы от прокатанных заготовок сечением 150×150 мм. Полученные результаты, представленные в табл. 2, сравнивались с данными испытаний, полученными от слитков, произведенных со скоростью переплава V_2 .

По шкалам ГОСТ 10243 на всех исследуемых образцах центральная пористость (ЦП) оценена в 0,50 балла, а точечная неоднородность (ТН) – в 1,00 балла. На рис. 1 графически представлена зависимость изменения механических свойств заготовки сечением 150×150 мм от скорости электрошлакового переплава. На плавках с повышенной скоростью переплава (V_3) отмечен рост показате-

Таблица 1
Сравнительная таблица изменения продолжительности электрошлакового переплава опытных плавок

Table 1
Comparative table of changes in the duration of electroslag remelting of experimental melts

№ испытания	Общая продолжительность переплава, ч:мин	Изменение расхода электроэнергии (от среднего), %
1	7:01	0,9
2	7:04	4,6
3	7:14	4,4
4	7:08	4,7
5	7:02	9,1
6	7:00	7,4
7	7:01	4,5
8	7:04	3,1
ЭШП со скоростью V_2 (объём выборки – 66 сравнительных плавок)	7:43	–

Таблица 2
Сравнение результатов лабораторных испытаний прокатных заготовок сечением 150×150 мм

Table 2
Comparison of laboratory test results for rolled blanks with a cross-section of 150×150 mm

Объём выборки (кол-во плавок), шт.	Макроструктура, балл		Предел текучести, кгс/мм ²	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс·м/см ²	Скорость переплава, кг/ч
	ТН	ЦП						
39 (сравнительные)	1,00	0,50	139,95	149,60	9,92	45,77	4,96	$k_2 \cdot d_{эл}$
4 (опытные)	1,00	0,50	142,04	151,55	9,88	42,54	5,19	$k_3 \cdot d_{эл}$

Примечание. ТН – точечная неоднородность; ЦП – центральная пористость.

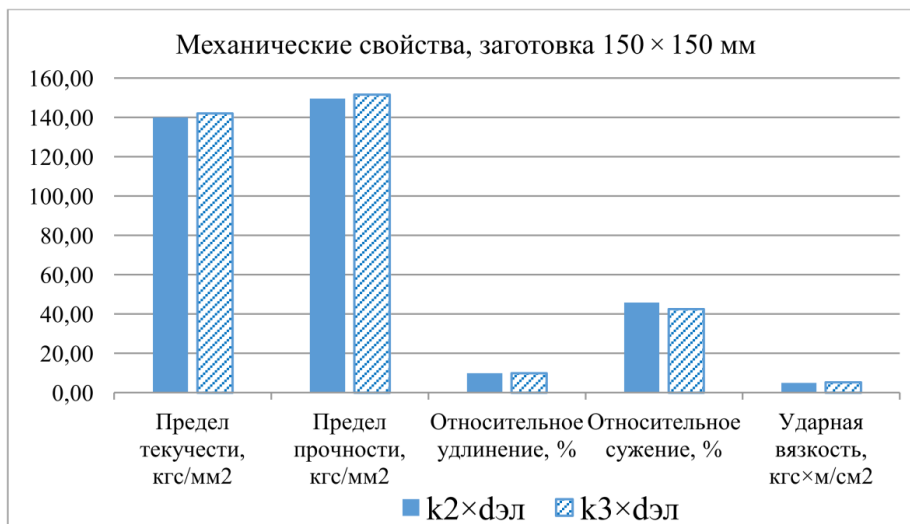


Рис. 1. Диаграмма зависимости механических свойств прокатанной заготовки от изменения скорости переплава

Fig. 1. Diagram of the dependence of the mechanical properties of the rolled blank on the change in the remelting speed

лей механических свойств, таких как предел текучести, предел прочности и ударной вязкости и незначительное снижение пластических свойств.

При производстве сортового металлопроката круглого сечения $\varnothing 53$ –60 мм также были отобраны пробы для подтверждения соответствия качества металла требованиям технических условий. Результаты лабораторных испытаний представлены в табл. 3. Весь прокат, полученный из опытных слитков, признан соответствующим требованиям технических условий, предъявляемых к продукции.

Для оценки влияния изменения скорости переплава ($V_2 \rightarrow V_3$) на свойства металлопродукции была осуществлена выборка по содер-

жанию неметаллических включений (оценка производилась по методу Ш5 ГОСТ 1778), а также по механическим и пластическим свойствам металлопроката из стали аналогичного типа профиля и сечения. Сравнительный массив данных с указанием средних значений по выбранным показателям, полученным при различных скоростях электрошлакового переплава, приведен в табл. 4, оценка загрязнённости стали неметаллическими включениями – в табл. 5.

Средние значения загрязнённости неметаллическими включениями металлопродукции из слитков, произведённых с различной скоростью переплава, приведены в сравнительной табл. 6.

Результаты лабораторных испытаний проката из опытных слитков ЭШП

Таблица 3

Results of laboratory tests of rolled products from experimental ESR ingots

Table 3

№ испытания	Профиль	Предел текучести, кгс/мм ²	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс·м/см ²
1	Круг обточенный 56	163,55	190,40	8,40	45,20	4,90
2	Круг обточенный 56	171,10	195,80	8,00	43,70	4,85
3	Круг обточенный 56	171,10	195,80	8,00	43,70	4,85
4	Круг обточенный 60	160,25	191,10	8,00	40,70	5,20
4	Круг обточенный 56	173,85	198,55	8,20	37,70	4,70
6	Круг обточенный 56	168,80	196,40	8,40	45,20	6,35
7	Круг обточенный 53	172,50	202,95	8,00	45,20	6,40
Минимальное значение		160,25	190,40	8,00	37,70	6,90
Максимальное значение		173,85	202,95	8,40	45,20	6,35
Среднее значение		170,15	196,65	8,17	43,45	5,34
Требования ТУ		150,00	180,00	8,00	35,00	4,00

Таблица 4

Результаты лабораторных испытаний металлопроката Ø48–60 мм

Table 4

Results of laboratory tests of rolled metal products Ø48–60 mm

Коэффициент скорости переплава	Профиль	Объём выборки, шт.	Предел текучести, кгс/мм ²	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс·м/см ²
$k_3 = 1,45$	Круг 53–60	7	168,74	195,86	8,14	43,06	5,32
$k_2 = 1,35$	Круг 48–60	55	167,71	196,49	8,57	43,24	6,20
$k_1 = 1,20$	Круг 53–60	168	170,71	197,33	8,78	42,94	5,97
Требования ТУ			150,00	180,00	8,00	35,00	4,00

Таблица 5

Оценка загрязнённости металлопродукции из опытных плавов неметаллическими включениями

Table 5

Assessment of contamination of metal products from experimental melts with non-metallic inclusions

№ испытания	Профиль	СХ	СП	СН	С	ОТ	ОС
Требования ТУ		2 (2,5)	2 (2,5)	2 (2,5)	2 (2,5)	2 (2,5)	2 (2,5)
1	Круг обточенный_56	0,5	0,5	1	0,5	2,5	2
2	Круг обточенный_56	0,5	0,5	1,5	0,5	2,5	1
4	Круг обточенный_56	0,5	0,5	1	0,5	2,5	1
5	Круг обточенный_60	1	1	1,5	0,5	2,5	1
6	Круг обточенный_53	0,5	0,5	2	0,5	2	0,5
6	Круг обточенный_56	0,5	0,5	2	0,5	2	0,5
7	Круг обточенный_56	0,5	0,5	2	0,5	2	0,5

Примечание. СХ – силикаты хрупкие; СП – силикаты пластичные; СН – силикаты недеформирующиеся; С – сульфиды; ОТ – оксиды точечные; ОС оксиды строчечные.

Таблица 6

Зависимость загрязнённости металлопродукции неметаллическими включениями от изменения скорости электрошлакового переплава

Table 6

Dependence of contamination of metal products with non-metallic inclusions on changes in the speed of electroslag remelting

Объём выборки, шт.	Профиль	СХ	СП	СН	С	ОТ	ОС	Коэффициент скорости переплава
7 (опытные)	Круг 53–60	0,65	0,6	1,6	0,5	2,3	0,9	k_3
44 (сравнительные)	Круг 46–60	0,65	0,65	1,74	0,73	1,84	0,68	k_2

На четырёх опытных плавках отмечено наличие точечных оксидов, соответствующих максимальному баллу, равному 2,5, что соответствует верхней границе требований ТУ, но превышающий средние значения для металлопродукции по серийной технологии (среднее значение 2,3 балла против 1,84 балла).

На рис. 2 и 3 представлена зависимость изменения механических свойств проката круга Ø53–60 мм от изменения скорости переплава ($V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3$).

По результатам выполненных работ по определению влияния скорости электрошлакового переплава можно сделать вывод, что зна-

чения параметров механических свойств металлопродукции из опытных слитков типовой конструкционной марки стали, произведённой со скоростью $1,45 \cdot d_{эл}$, остаются на уровне значений параметров металлопродукции из слитков, полученных со скоростью переплава $1,35 \cdot d_{эл}$, за исключением ударной вязкости, где результат понизился в среднем на 14 %, но остался на уровне требований технических условий к продукции. Оценка загрязнённости исследуемой стали неметаллическим включениями показала, что все значения соответствуют требованиями технических условий.

В ходе выполнения первого этапа работ

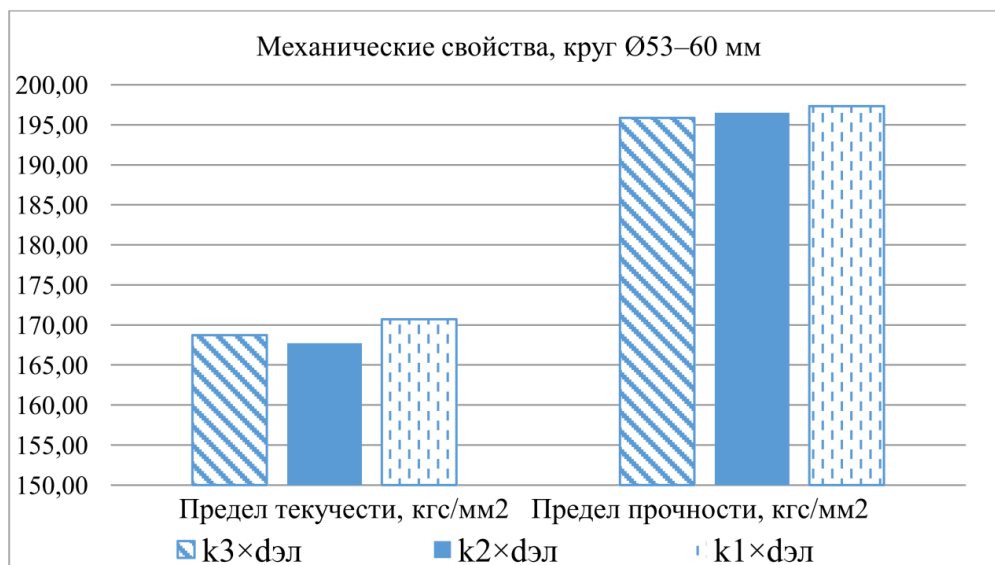


Рис. 2. Механические свойства проката (круг Ø53–60 мм) из слитков ЭШП, произведенных при различных скоростях
Fig. 2. Mechanical properties of rolled products (round Ø53–60 mm) from ESR ingots produced at different speeds

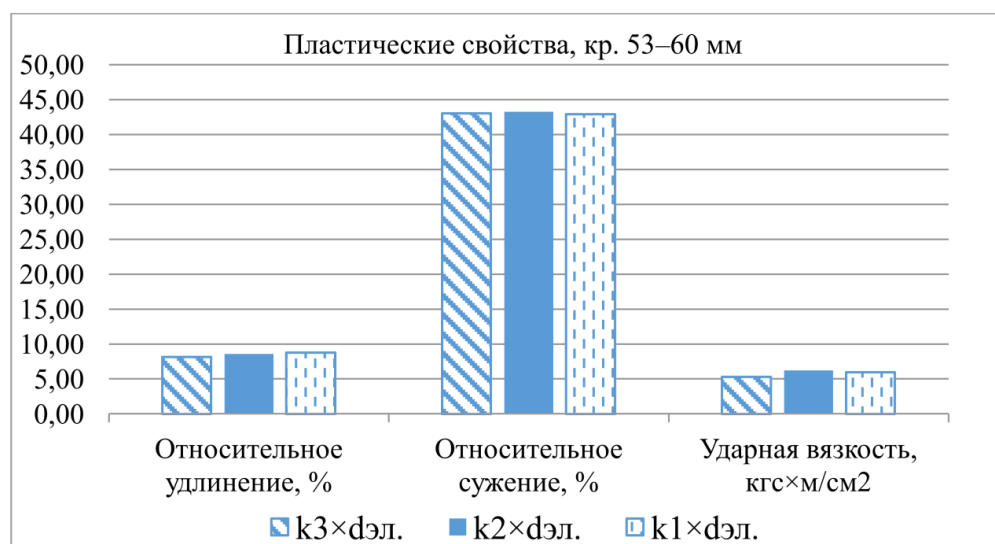


Рис. 3. Пластические свойства проката (круг Ø53–60 мм) из слитков ЭШП, произведенных при различных скоростях
Fig. 3. Plastic properties of rolled products (round Ø53–60 mm) from ESR ingots produced at different speeds

достигнуто снижение продолжительности переплава на 7,4 %, а на втором этапе – на 8,4 %. Сквозное снижение продолжительности (при $V_1 \rightarrow V_3$) составило 15,2 %.

Описанное в настоящей статье повышение скорости переплава $V_2 \rightarrow V_3$ привело к снижению фактического расхода электроэнергии на тонну слитка на 5 %.

Список литературы

1. Воробьев А.А., Пожидаев Ю.В. Электрошлаковый переплав: учеб. пособие. Новокузнецк: Сибир. гос. индустр. ун-т, 2002. 116 с.
2. Медовар Б.И., Цикуленко А.К., Дяченко Д.М. Качество электрошлакового металла / под ред. Б.Е. Патона, Б.И. Медовара. Киев: Наукова Думка, 1990. 312 с.

3. Неметаллические включения и дефекты в электрошлаковом слитке / С.Е. Волков, А.Е. Волков, Ю.И. Забалуев, Г.А. Буряковский. М.: Metallurgy, 1979. 135 с.
4. Электрошлаковый переплав – способ кардинального повышения качества и свойств ответственных изделий в современном машиностроении. Технические требования и новые решения / А.В. Дуб, В.С. Дуб, Ю.Н. Кригер и др. // Тяжелое машиностроение. 2012. № 6. С. 2–6.
5. Тильман Р., Крейенберг И. Исследование параметров, влияющих на качество слитков ЭШП и на экономичность процесса // Электрошлаковый переплав. Киев: Наукова Думка, 1987. Вып. 9. С. 99–114.
6. Протоковиллов И.В., Порохонько В.Б. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП // Современная электрометаллургия. 2014. № 03. С. 7–14.
7. Установка электрошлакового переплава для производства слитков массой 4 т (ЭШП): Руководство по эксплуатации INTECO. 2018.

References

1. Vorobyev A.A., Pozhidaev Y.V. *Elektroshlakovyy pereplav: ucheb. posobie* [Electroslag remelting: Study guide]. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2002. 116 p. (In Russ.)
2. Medovar B.I., Tsikulenko A.K., Dyachenko D.M.; edited by B.E. Paton, B.I. Medovar. *Kachestvo elektroshlakovogo metalla* [Quality of electroslag metal]. Kiev: Naukova Dumka, 1990. 312 p. (In Russ.)
3. Volkov S.E., Volkov A.E., Zabaluev Yu.I., Buryakovskiy G.A. *Nemetallicheskie vklyucheniya i defekty v elektroshlakovom slitke* [Non-metallic inclusions and defects in electroslag ingot]. Moscow: Metallurgiya, 1979. 135 p. (In Russ.)
4. Doub A.V., Doub V.S., Kriger Y.N. et al. Electroslag remelting as the method of radically quality and properties improving of the superduty products for modern engineering. Technical requirements and new solutions. *Tyazheloye mashinostroyeniye*. 2012;(6):2–6. (In Russ.)
5. Tilman R., Kreienberg I. [Investigation of the parameters influencing the quality of ESF ingots and the process efficiency]. In: *Elektroshlakovyy pereplav* [Electroslag remelting]. Kiev: Naukova Dumka, 1987. Iss. 9. P. 99–114. (In Russ.)
6. Protokovilov I.V., Porokhonko V.B. Methods of ingot metal crystallization control at EAF. *Electrometallurgy Today*. 2014;(03):7–14. (In Russ.)
7. *Ustanovka elektroshlakovogo pereplava dlya proizvodstva slitkov massoy 4 t (EShP): Rukovodstvo po ekspluatatsii INTECO* [Electroslag remelting plant for production of ingots of 4 t weight (ESR): INTECO operating manual]. 2018. (In Russ.)

Информация об авторах

Ищук Евгений Иванович, аспирант кафедры электрометаллургии, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия; ведущий инженер-технолог, ООО «НПО Лаборатория специальных сталей и сплавов», Санкт-Петербург, Россия; jnyaishuk@gmail.com.

Грицюк Александр Александрович, аспирант кафедры физики и технологий материалов, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; начальник технологического отдела, ООО «НПО Лаборатория специальных сталей и сплавов», Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Yevgeny I. Ishchuk, Postgraduate Student of the Department of Electrometallurgy, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia; Lead Process Engineer, LLC “NPO Laboratory of special steels and alloys”, St. Petersburg, Russia; jnyaishuk@gmail.com.

Alexander A. Gritsiuk, Postgraduate Student of the Department of Physics and Technologies of Materials, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia; Head of Technological Department, LLC “NPO Laboratory of special steels and alloys”, St. Petersburg, Russia.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025

The article was submitted 28.01.2025