

ВЛИЯНИЕ РОДА ТОКА И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО МЕТАЛЛА

Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов

EFFECT OF CURRENT TYPE AND SPEED OF THE CONSUMABLE ELECTRODE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTROSLAG METAL

D.A. Pyatygin, I.V. Chumanov

Рассмотрено влияние постоянного тока и вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на механические свойства выплаваемого металла как в литом, так и в деформированном состоянии. Показано, что ведение электрошлакового переплава на постоянном токе с вращением расходуемого электрода не снижает механических характеристик полученного металла, несмотря на достаточно значительное увеличение производительности процесса без подведения дополнительной мощности.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, вращение электрода, постоянный ток, механические свойства.

In this paper we consider the effect of direct current and the rotation of the consumable electrode in electroslag remelting on the mechanical properties of melted metal in both as-cast and deformed state. It is shown that keeping the electroslag remelting on the direct current with rotation of the consumable electrode does not reduce the mechanical properties of the resulting metal, in spite of the fairly significant increase in productivity of the process without summing up extra power.

Keywords: electroslag remelting, rotation of the electrode, direct current, mechanical properties.

В работах авторов [1–3] показано положительное влияние постоянного тока и вращения расходуемого электрода вокруг своей оси при электрошлаковом переплаве (ЭШП) на технико-экономические показатели переплава, структуру электрошлакового слитка и рафинирующую способность процесса от неметаллических включений. Также одним из критериев качества металла являются механические свойства, которые в свою очередь зависят в достаточно большой степени от технологии выплавки стали. В данной работе про-

анализировано влияние рода тока и скорости вращения расходуемого электрода на механические свойства электрошлакового металла как в литом, так и в деформируемом состоянии.

Переплаву были подвергнуты электроды из стали марки 30X13 и 30XMA на полупромышленной установке А-550. Технологические параметры плавки представлены в табл. 1. Переплав осуществляли твердым стартом на флюсе АНФ-6. Ток и напряжение во всех случаях поддерживались постоянными ($I = 0,8$ кА; $U = 46$ В). По разработан-

Таблица 1

Технологические параметры опытных плавки

№ плавки	Марка стали	Род тока	Кол-во оборотов, об/мин	Массовая скорость переплава, кг/ч	Расход эл. эн., кВт·ч/кг	Толщина гарнисажа, мм
10	30X13	Пост.	0	10,62	1670,63	2,0
11	30X13	Пост.	90	14,70	1037,81	1,6
12	30X13	Пост.	120	14,21	1112,42	1,7
13	30XMA	Перемен.	0	8,43	1680,00	2,4
14	30XMA	Перемен.	120	10,84	898,23	1,6
15	30XMA	Пост.	0	11,42	1638,65	2,2
16	30XMA	Пост.	60	12,12	1318,92	2,0
17	30XMA	Пост.	90	12,58	1125,00	1,6
18	30XMA	Пост.	120	14,40	803,71	1,4

ным ранее аналитическим зависимостям [4] была определена оптимальная скорость вращения расходуемого электрода с позиций производительности и качества. Для электрода диаметром 40 мм она составила 90 об/мин. Экспериментальные плавки проводили как с рекомендованной (рассчитанной)

скоростью вращения, так и со скоростями ниже и выше оптимальной.

Средние значения механических свойств литой заготовки диаметром 90 мм стали 30X13-Ш представлены на рис. 1, а деформированной заготовки (квадрат 25) стали 30ХМА – на рис. 2.

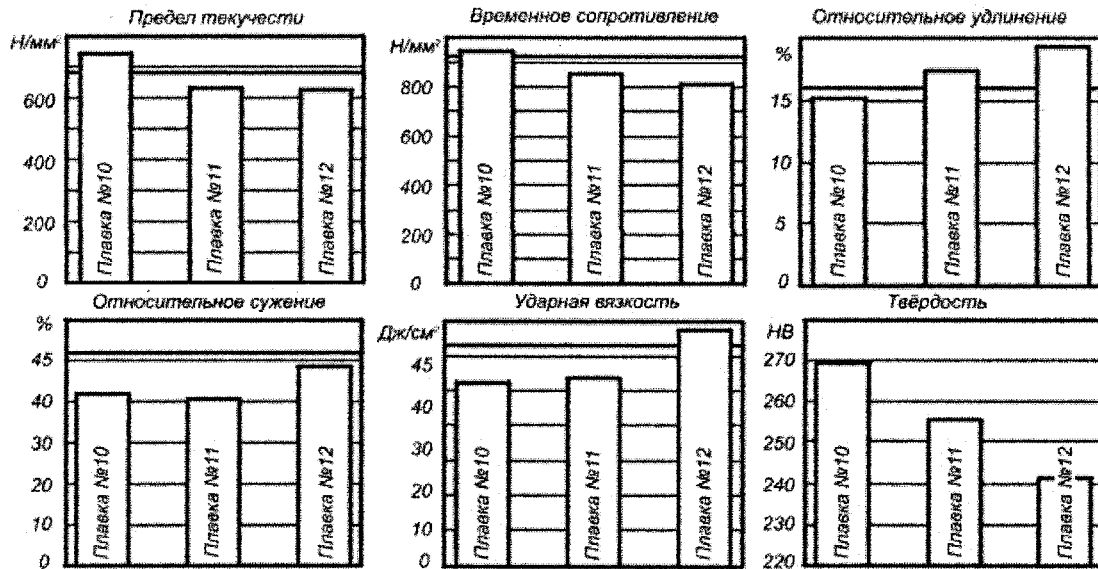


Рис. 1. Механические свойства стали 30X13-Ш в литом состоянии (горизонтальная линия – свойства деформированной стали 30X13 после термической обработки [5])

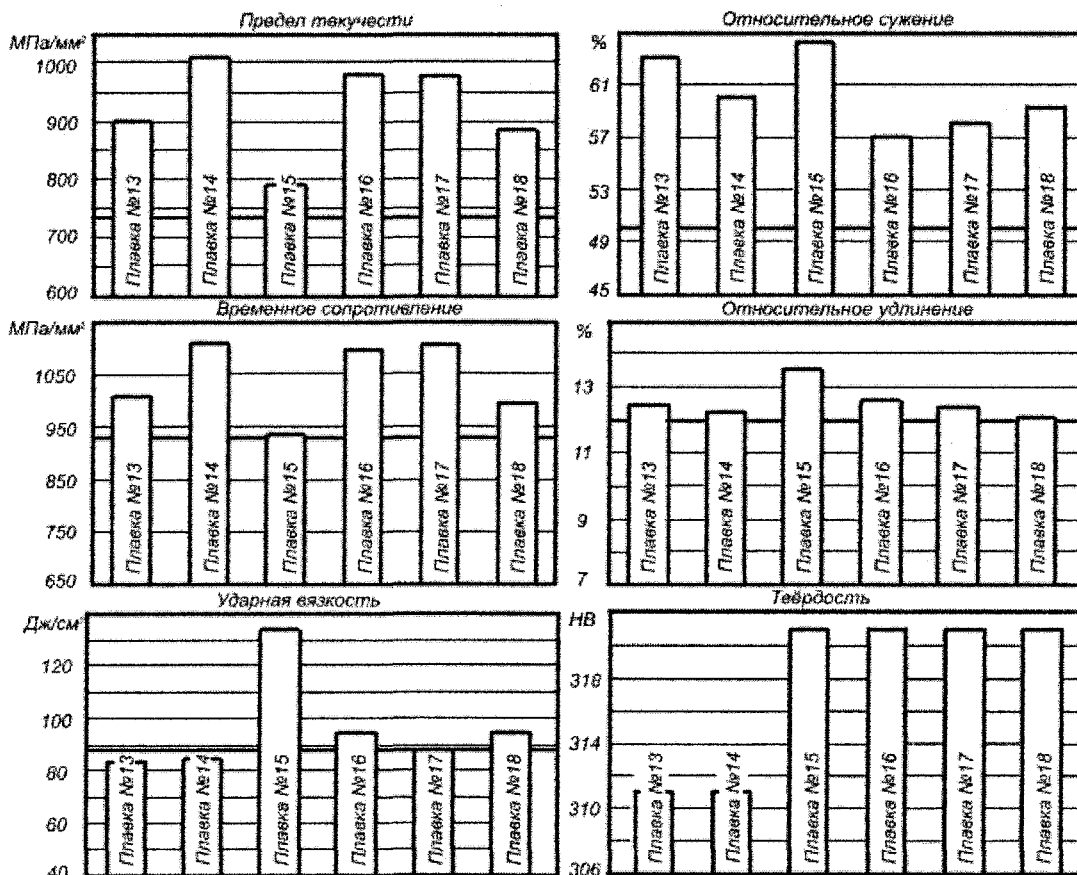


Рис. 2. Механические свойства стали 30ХМА-Ш в деформированном состоянии (горизонтальная линия – значения по ГОСТ 4543-71)

Сталь марки 30X13 в литом состоянии, полученная электрошлаковым переплавом на постоянном токе с различной скоростью вращения расходного электрода, исследовалась на механические свойства по нижеприведенной методике. Перед испытаниями, в соответствии с ГОСТ 5949–75 «Сталь сортовая и калиброванная коррозионно-стойкая жаростойкая и жаропрочная» коррозионно-стойкую сталь 30X13 подвергли термической обработке по режиму: закалка с 950–1050 °С, охлаждение в масле, отпуск при 200–300 °С, охлаждение на воздухе или в масле. Такая термообработка проводится только для определения твердости HRC (не менее 48 ед.). Все полученные образцы удовлетворяли требованиям ГОСТа. Режим термической обработки и нормы механических свойств при испытании стали 30X13 на растяжение и на ударный изгиб в ГОСТ 5949–75 отсутствуют. Однако имеются справочные данные по механическим свойствам для деформированной стали 30X13 после термической обработки по режиму: закалка+высокий отпуск [5]. Данные для деформированного металла

(пруток) приведены в табл. 2, при этом следует отметить, что отсутствуют сведения: к пруткам какого размера относятся эти данные; неизвестны твердость и ударная вязкость.

Для определения механических свойств путём растяжения и на ударный изгиб для литой стали 30X13-Ш из опытных слитков были вырезаны образцы и подвергнуты термической обработке в соответствии с режимом, указанным в табл. 2. После термической обработки были проведены испытания механических свойств. Результаты испытания прочностных и пластических свойств опытных плавок литой стали 30X13-Ш различных вариантов ЭШП приведены в табл. 3. Анализ результатов испытания механических свойств показал, что нормам механических свойств, представленным в табл. 2, не соответствуют все три плавки (табл. 4). Поплавно количество результатов, не удовлетворяющих нормам по каждой характеристике механических свойств, приведены в табл. 4.

По прочностным характеристикам минимальное количество неудовлетворительных результа-

Таблица 2

Механические свойства стали 30X13 в деформированном состоянии [5]

Режим термической обработки	Механические свойства				
	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
Нормализация с 1000 °С, 1 ч, охлаждение на воздухе; отпуск 650 °С, 2,5 ч, охлаждение на воздухе	690	920	16	52	53

Таблица 3

Механические свойства литой стали 30X13-Ш

№ плавки	Номер образца	Механические свойства					
		σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	HВ
10	1А	708	929	16,4	45,7	43	269
	1А	737	949	16,4	41,5	46	269
	1У	751	948	13,2	38,1	69	269
	1У	762	933	14,8	41,5	52	269
11	2А	629	842	17,6	41,8	57	255
	2А	618	832	18,4	39,4	60	255
	2У	563	833	16,4	38,9	53	255
	2У	706	864	17,2	42,0	46	255
12	3А	675	840	18,0	50,4	58	241
	3А	623	802	21,6	48,0	69	241
	3У	591	806	17,2	48,0	83	241
	3У	606	782	20,8	47,7	60	241

Таблица 4

Количество неудовлетворительных результатов механических свойств в литой стали 30X13-Ш

№ плавки	Всего результатов	Количество неудовлетворительных результатов, шт. (%)	Механические свойства					
			σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	HВ
10	20	10 (50)	–	1	2	4	3	269
11	20	12 (60)	3	4	–	4	1	255
12	20	12 (60)	4	4	–	4	–	241

тов имеет плавка № 10 при твёрдости 269; плавки № 11 и 12 имеют соответственно 7 и 8 неудовлетворительных результатов при твёрдости 255 НВ и 241 НВ, т. е. чем мягче образцы после термообработки, тем больше отклонение от норм – плавка № 10: $\sigma_{Вср} = 930,5 \text{ Н/мм}^2$ при норме 940 Н/мм^2 ; плавка № 11 – 860 Н/мм^2 ; плавка № 12 – 824 Н/мм^2 .

Из характеристик пластичности наиболее благоприятной является относительное удлинение – всего 2 неудовлетворительных результата; по относительному сужению все 3 плавки (12 образцов) имеют неудовлетворительные результаты: при норме не менее 52 % значения ψ меняются в пределах 38,1 – 50,4 %. В зависимости от твёрдости значения ψ изменяются в плавке № 10 от 38,1 до 45,7 % при твёрдости 269 НВ; в плавке № 11 от 38,9 до 42,0 % при твёрдости 255 НВ; в плавке № 12 – от 47,7 до 50,4 % при твёрдости 241 НВ. Ударная вязкость также возрастает с уменьшением твёрдости, причём на плавке № 12 при твёрдости 241 НВ все значения КСУ положительные и имеют запас от 5 до 30 КСУ, Дж/см² при среднем значении 67,2 КСУ, Дж/см².

Таким образом, исследование механических свойств в литом металле стали марки 30Х13-Ш показало, что свойства электрошлакового металла сравнимы со свойствами деформированного металла. Следует отметить, что с увеличением скорости вращения электрода происходит повышение пластических и понижение прочностных свойств металла.

Важной характеристикой литого металла является его удельная плотность. Для анализа влияния условий переплава на плотность стали были проведены измерения удельной плотности методом гидростатического взвешивания. В качестве рабочей жидкости применяли тетробромэтан. Плотность тетробромэтана и его температурная зависимость достаточно известны. С помощью термостата температуру в процессе измерения плотности поддерживали постоянной и измеряли термометром с точностью $\pm 0,1$ град. Относительная ошибка в определении плотности составила $7 \cdot 10^{-3} \%$.

Усреднённые по шести образцам значения плотности приведены в табл. 5. Из полученных результатов видно, что плотность стали возрастает от центра к периферии. Понижение плотности

центральной области обычных слитков объясняется тем, что при движении фронта кристаллизации от периферии к центру слитка оттесняются примеси, неметаллические включения. На границах стыка дендритов возникают микропоры и микротрещины. В условиях ЭШП с вращением электрода фронт кристаллизации выравнивается и превращается в плоскость, перпендикулярную оси слитка [1]. Отмечено, что с увеличением скорости вращения электрода плотность как отдельных частей слитка, так и средняя по сечению несколько снижается. Относительное уменьшение плотности, связанное с вращением расходуемого электрода, не превышает 0,04 % и сравнимо по величине с изменением плотности по сечению слитка. Уменьшение плотности после переплава с вращением электрода можно объяснить либо наличием микроскопических нарушений плотности металла, образование которых связано с возникновением центробежных сил в зоне расплавленного металла, либо с уменьшением блоков мозаичной структуры и ростом микронапряжений II рода вследствие ускорения процессов кристаллизации.

Для оценки влияния изменения технологии на механические свойства в деформированном состоянии слитки стали марки 30ХМА-Ш подвергли ковке. После деформации на квадрат 25 мм металл был отожжен по режиму: 720 °С, выдержка 5 часов, охлаждение до 500 °С с печью, дальнейшее охлаждение на воздухе.

В соответствии с ГОСТ 4543–71 «Сталь легированная, конструкционная» механические свойства контролируют после термической обработки по режиму: закалка с 880 °С, охлаждение в масле, отпуск при 540 °С, охлаждение в воде или масле. Перед закалкой ГОСТ разрешает производить нормализацию; при проведении термической обработки допускаются следующие отклонения по температуре нагрева: при закалке ± 15 °С; при высоком отпуске ± 50 °С; с учётом допусков ободренные до круга 15 мм заготовки были обработаны термически следующим образом: нормализация 910 °С, 1 ч, охлаждение на воздухе; закалка с 890 °С, 1 ч, охлаждение в масле; отпуск 540 °С, 45 мин, охлаждение в воде. После термообработки все шесть плавков были переданы на изготовление образцов и в последующем испытаны на растяжение и ударный изгиб. Результаты испытаний представлены на рис. 2.

Таблица 5

Изменение удельной плотности стали марки 30Х13-Ш
при различных скоростях вращения расходуемого электрода

Удельная плотность, г/см ³	Скорость вращения электрода, об/мин		
	0	90	120
Край	7,7338	7,7326	7,7316
½ радиуса	7,7329	7,7316	7,7293
Центр	7,7329	7,7307	7,7297
Среднее значение	7,7330	7,7316	7,7302

Анализ механических свойств показал, что металл, выплавленный по всем схемам переплава, удовлетворяет требованиям ГОСТ 4543–71.

Заключение

Исследование электрошлакового металла показало, что применение постоянного тока и вращения расходуемого электрода не снижает механических характеристик полученного металла, несмотря на достаточно значительное увеличение производительности процесса без подведения дополнительной мощности. Следует отметить, что применение при электрошлаковом переплаве на постоянном токе с вращением расходуемого электрода вокруг своей оси происходит выравнивание плотности слитка по сечению.

Работа выполнена в рамках целевой программы АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010)» № 2.1.2/657 и Госконтракта № ПЗ16.

Литература

1. Чуманов, И.В. Особенности ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода / И.В. Чуманов, Д.А. Пятыгин // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2006. – № 3. – С. 22–25.
2. Пятыгин, Д.А. Удаление неметаллических включений при ЭШП на постоянном токе / Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2006. – № 7. – С. 25–26.
3. Селиверстов, Д.А. К вопросу экономической целесообразности перевода печей ВДП в печи ЭШП на постоянном токе / Д.А. Селиверстов, Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2007. – № 1. – С. 24–26.
4. Пятыгин, Д.А. К вопросу оценки электромагнитных сил, возникающих при ЭШП на постоянном токе / Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2007. – № 7. – С. 19–22.
5. *Металловедение и термическая обработка* / под. ред. акад. М.Л. Бернштейна, к.т.н. А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургиздат, 1956. – 1204 с.

Поступила в редакцию 9 марта 2011 г.