



УДК 519.25 : 621.774.21-034.35' 5

**М.З. Певзнер, С.П. Грачёв,
К.В. Иванов-Польский,
Е.А. Куимов, С.А. Смертин**
ФГБОУ ВО «Вятский государственный
университет (ВятГУ)»,
г. Киров, Россия
E-mail: mikhailpevzner@yandex.ru
Дата поступления 15.05.2018

О КАЧЕСТВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ ЛАТУННЫХ ТРУБ

Аннотация

Представлены результаты статистического анализа химического состава, структуры, параметров технологии и конечного качества 257 опытно-промышленных партий труб из сплава Л68, полученных непрерывной формовкой и высокочастотной сваркой. Установлен целый ряд факторов, уменьшающих негативное влияние на качество сварки неизменно присутствующей вредной примеси свинца. Предложено и опытным путём обосновано повышение качества сварки путём увеличения содержания в латуни кремния.

Ключевые слова: трубосварка, латунные трубы, высокочастотная сварка, трубная сварная заготовка, кремнистая латунь.

Введение

Способ производства труб, в частности, для теплообменных аппаратов [1], заключающийся в формовке ленточной заготовки в трубу, её продольной высокочастотной сварке и волочении до требуемого размера, разрабатывался отечественными и зарубежными специалистами [2-4]. Он характеризуется высокой эффективностью: меньшими удельными затратами энергии, высоким выходом годного, относительно низкими трудоёмкостью и себестоимостью в сравнении, например, с прессованием вследствие отсутствия пресс-остатка. Кроме того, использование в качестве заготовки ленты, как правило, обеспечивает выполнение достаточно жёстких регламентированных требований к точности толщины стенки трубы (допуск на толщину составляет ~10 % от номинала). Однако необходимым условием качества готовых труб является высокое качество сварного шва, определяемое результатами испытаний на раздачу (до 20 %), сплющивание, герметичность и на разрыв [1]. Тогда последующая обработка (деформация волочением и отжиг), особенно многократная, приводит к полному исчезновению даже следов сварного шва. В противном случае неизбежны

обрывы при волочении и нарушения сплошности.

При производстве таких труб из сплава Л68, содержащего, в частности, свинца не более 0,03 % и нерегламентируемые примеси с общим объёмом не более 0,3 % [6], на Кировском заводе ОЦМ (КЗОЦМ) в районе сварного шва периодически обнаруживался специфический вид брака – «поперечные трещины» [7] (рисунок 1), приводящий к значительным материальным потерям.

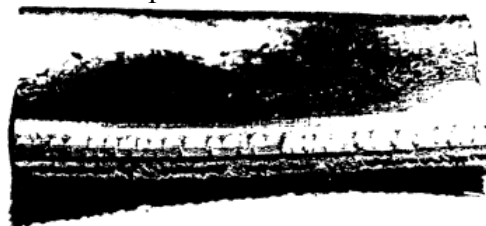


Рисунок 1. Дефект «поперечные трещины» на отрезке трубы, сваренной из ленты латуни Л68 толщиной 1,8 мм, после контрольного испытания на «сплющивание» по ГОСТ 8695-75

Целью настоящей работы было исследование влияния широкого комплекса факторов, в первую очередь, содержания примесей на трещинообразование при высокочастотной сварке, и определение наиболее

эффективного способа получения качественной трубной заготовки.

Ретроспективный обзор ранее проведённых работ

Явление образования поперечных трещин при высокочастотной трубосварке изучалось ещё в 80-е годы, когда впервые на отечественном оборудовании стала осваиваться продольная сварка латунной ленты с частотой >200 кгц [7, 8]. На основании гипотезы П.А. Ребиндера о снижении поверхностной энергии и разрыве межатомных связей в вершине трещины, заполненной расплавом [9], была разработана модель охрупчивания латуней [10]. Полагали, что

причиной трещинообразования является наличие в ленточной заготовке примесей ряда металлов (в первую очередь железа и свинца [8, 10]), образующих эвтектику по границам зёрен. Проведённые впоследствии обширные исследования влияния железа и свинца на качество сварки¹ показали доминирующее негативное влияние легкоплавкого свинца [11, 12]. Вместе с тем отсутствие чёткой границы между содержанием свинца, приводящим и не приводящим к браку, рисунок 2, позволяло предполагать, что имеются и другие факторы, оказывающие влияние на качество, но не учитываемые в этих первоначальных исследованиях.

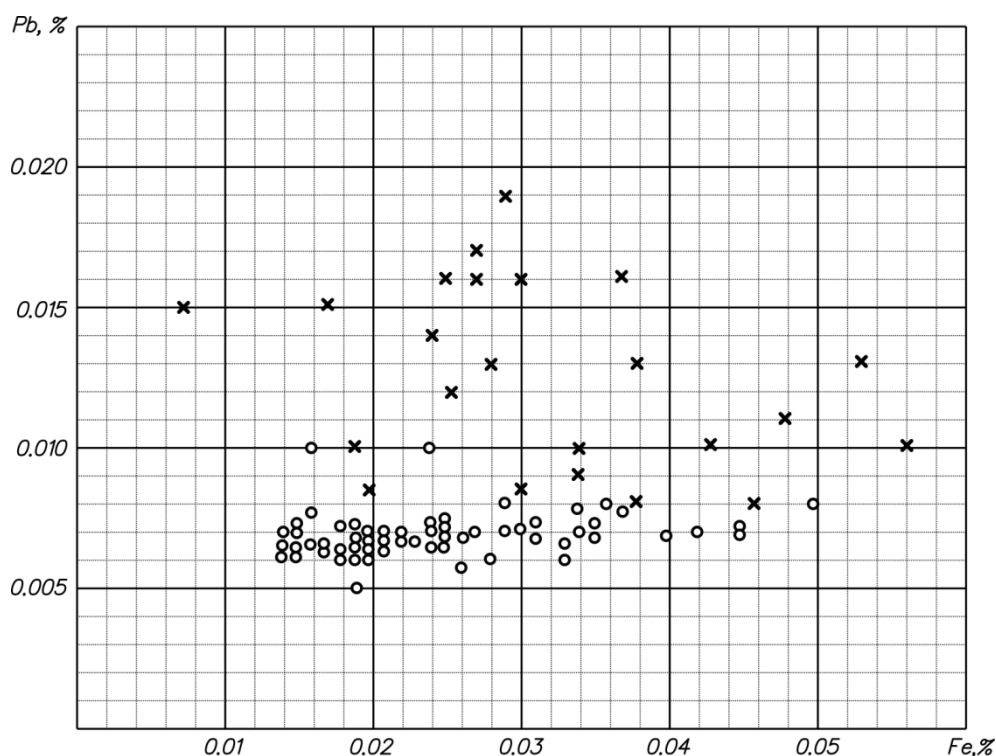


Рисунок 2. Содержание свинца (Pb) и железа (Fe) в сварной заготовке из латуни Л68 высокого качества (○) и имеющей поперечные трещины в зоне сварного шва (X)

В соответствии с теорией «межзёрного охрупчивания» [9, 10] было естественно предположить негативное влияние на качество сварки величины зерна. Действительно, с увеличением зерна площадь межзёрных границ уменьшается и, соответственно, увеличивается концентрация на них «вредоносных» примесей. В этом отношении следует отметить японские

сплавы для сварных труб [13, 14], регламентирующие значительное количество фосфора (0,005-0,070 %), который обеспечивает после окончательного отжига мелкий размер зерна и, тем самым, стойкость к трещинообразованию.

Выполненное на КЗОЦМ обширное исследование совместного влияния на качество сварки содержания свинца и величины

¹ В работе принимали участие Филиппов А.А., Русакова В.А., Куликова Е.М. и др.

зерна позволило определить условие предотвращения трещинообразования [7], на котором был основан способ термической обработки ленты из латуни Л68 [15]:

$$\mu \leq 0,30/(Pb - 0,005) \quad (1)$$

где μ - величина зерна, мкм; Pb - содержание Pb, %.

Для внедрения способа в условиях промышленного производства при плавке латуни Л68 отбиралась литая проба, по результатам анализа которой² определялось направление дальнейшей обработки конкретной партии металла («превентивный контроль» [16]). В случае выполнения ограничения $Pb \leq 0,007$ % латунь направлялась на производство трубной заготовки – такое содержание свинца позволяло при садочном отжиге предназначенной для сварки ленты свободно получать величину зерна ($\mu \leq 150$ мкм), удовлетворяющую условию (1). При невыполнении данного условия из этого металла изготавливались листы и ленты другого назначения. Введение более жёстких по сравнению с имеющимися (в ГОСТ 15527-2004 – 0,03 %) ограничениями на содержание примесей в латуни, предназначенной для трубосварки, позволило в условиях того времени избежать трещинообразования [7, 15]. Использование способа позволило получить на КЗОЦМ годовую экономию в размере 68704034,8 руб.³ по курсу 1994 года.

С течением времени цены на качественную шихту (ранее часто использовались чистые медь и цинк) неизмеримо возросли, и при плавке латуни Л68 в качестве шихты стали использоваться латунные лом и отходы собственного производства. Ранее используемое ограничение по содержанию свинца оказалось невыполнимым, а попытки увеличения его допустимого содержания за счёт более жёсткого ограничения величины зерна и выполнения тем самым условия (1) давали сбои (при садочном отжиге садки массой 16-17 т нужную величину зерна не всегда удавалось получить). В результате поперечные трещины вновь стали частым явлением заводской практики

и возникла необходимость разработки иных способов их предотвращения.

Статистический анализ влияния состава латуни и технологических факторов на образование трещин⁴ включал совместное исследование состава и качества 115 промышленных партий трубной заготовки, изготовленных по различным технологиям. Варьировались:

- количество переходов при холодной прокатке ленточной заготовки ($k = 2$ или $k = 1$, иначе – наличие или отсутствие промежуточного отжига);

- толщина свариваемой ленты $h = 1,4; 1,8; 2,0; 2,2$ мм;

- величина зерна в микроструктуре образца сваренной трубы $\mu = 25-170$ мкм;

- частота $\gamma = 250; 440$ кгц;

- содержание в трубах каждой партии тех примесей (Pb, Mn, Fe, Ni в тыс. долях %), которые по нашему на тот момент представлению и данным [5, 7] могут оказывать наибольшее влияние на качество сварки, оцениваемое по пятибалльной шкале.

Полученные результаты линейного регрессионного анализа программы Excel [14], табл. 1, показывали достоверность линейной регрессионной модели связи (достаточно низкое значение «Значимость F», преобладание MS(p) над MS(o)). На основании представлений [15], что с увеличением t-статистики Стьюдента и, соответственно, уменьшением Р-значения вероятностей достоверность полученных коэффициентов регрессии увеличивается, по результатам анализа были сделаны заключения:

- из всех рассмотренных факторов положительное влияние на качество сварки оказывает увеличение содержания марганца и прокатка за 2 перехода ($k = 2$) взамен одного;

- безусловно, сильнейшее негативное влияние на качество сварки оказывает увеличение содержания свинца, а также повышение частоты и толщины свариваемой ленты.

² В работе принимала участие Прозорова Г.В.
³ В работе принимал участие Лужбин А.С.

⁴ В работе принимали участие Михалёв В.М., Прозорова Г.В., Поляев С.Н., Филиппов А.А., Надёжкин М.П.

Таблица 1

Итоги линейного множественного регрессионного анализа влияния исследуемых факторов на качество сварки 115 опытно-промышленных партий

Регрессионная статистика						
R (коэфф. множественной корреляции)		R-квадрат (коэфф. детерминации)		Нормированный R-квадрат		Стандартная ошибка
0,67		0,45		0,41		1,36
ANOVA (таблица дисперсионного анализа)						
Источник вариации		df (число степ. свободы.)	SS (сумма квадратов)		MS (=SS/df)	Значимость F
Обусловленный регрессией (р)		8	158,1		19,76	5,3E-11
Относит. регрессии (остаток (о))		106	194,3		1,83	
Итого		114	352,3			
Результаты расчёта коэффициентов регрессии						
Исследуемые параметры	Коэфф. регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика (Стьюдента, для среднего)	Р- значение	Нижние и верхние границы коэфф. для доверит. вероят-ти 95%	
У-пересечение	10,01	1,98	5,05	1,9E-06	6,1	13,9
Pb	-0,27	0,049	-5,54	2,2E-07	-0,368	-0,174
Mn	0,103	0,028	3,7	0,00034	0,048	0,159
Fe	-0,0011	0,015	-0,075	0,941	-0,031	0,029
Ni	-0,0144	0,0075	-1,92	0,057	-0,029	0,00045
γ	-0,0067	0,0021	-3,237	0,0016	-0,011	-0,0026
κ	0,87	0,32	2,75	0,007	0,244	1,498
h	-2,37	0,775	-3,06	0,0028	-3,91	-0,84
μ	-0,0057	0,0039	-1,46	0,146	-0,014	0,00203

Таким образом, в результате промышленных исследований широкого комплекса факторов впервые статистически показано, что наряду с примесями, способствующими трещинообразованию, имеются элементы (марганец), препятствующие этому явлению. Опытные работы по модифицированию серийных слитков латуни Л68 марганцем дали положительные результаты – все партии трубной заготовки, содержащие свинец не более 0,011 % (действующее на тот момент ограничение) имели сварной шов высокого качества. Для подтверждения эффективности модифицирования Mn и с целью расширить это ограничение до 0,02 % при плавке слитков Л68 специально добавляли Pb. Но при содержании Pb

больше 0,011 % достаточно высокого качества сварки достигнуть не удалось. (Возможно, это обусловлено неверным подбором соотношения Pb - Mn, сделанным без учёта нахождения этих элементов в расплаве болота печи относительно их соотношения в конкретно используемой шихте и способности Mn к участию в шлакообразовании.)

Исследование влияния кремния на качество трубосварки

С течением времени использование в качестве шихты отходов собственного производства и привозных ломов постепенно ухудшающегося качества естественным образом увеличивает содержание в шихте

примесей. Долго действующее ограничение для трубной латуни $Pb < 0,011\%$ уже перестало удовлетворять потребности производственного планирования. Возникла потребность увеличения допустимого содержания Pb в трубах до $0,02\%$.

Представление о возможности эффективного использования кремния для повышения качества сварки возникло при выполнении специального заказа по производству труб из сплава Л68 с содержанием кремния, выходящим за пределы, устанавливаемые ГОСТ [6] для общего количества нерегламентируемых примесей. Было обнаружено, что в этих трубах нет трещин даже при содержании свинца, критическом для обычно производящихся труб⁵. На основании этих результатов и представлений о наличии элементов, имеющих энергию связи с границами большую, чем свинец, но, в отличие от последнего, не снижающих поверхностную энергию и прочность [9, 10], нами предпринято широкое промышленное исследование путём модифицирования кремнием всей трубной заготовки⁶. При этом уже установленному влиянию ряда факторов (содержанию марганца, частоте, на которой работает трубосварочный агрегат, толщине ленты и количеству переходов при её производстве) не уделялось существенного внимания. Они не варьировались вообще (частота) или варьировались мало (толщина, количество переходов). Стояла задача в первую очередь исследовать влияние на качество сварки свинца и кремния.

Методическая часть

При плавке латуни Л68 в печах ИЛК-1.6 в качестве одного из компонентов шихты в части плавок использовали лома из кремнийсодержащего сплава (ЛК75-0,5) или вводили в расплав чистый кремний. Предварительно содержание химических элементов в сплаве контролировали спектральным «экспресс-анализом» литой пробы⁷. Слитки размером $180 \times 600 \times 1500$ мм, различающиеся по химическому со-

ставу, не разграничивали, как ранее, превентивным контролем [16] по максимально допустимому для трубного производства содержанию свинца. Их нагревали с использованием природного газа в проходной методической печи в течение 3,5 часов при температуре, уменьшающейся по зонам печи с 980 до 920°C , в результате чего температура слитка на выходе составляла $800 \pm 20^{\circ}\text{C}$, и прокатывали на реверсивном 2-валковом стане по схеме: $180-157-125-97-73-53-37-24-15-9-(5,5 \dots 7,0)$ мм со свёрткой в рулон. Холодную прокатку осуществляли на 3-клетевом стане Тандем-1000 в 2 прохода до промежуточного размера $3,2$ мм, а затем - до конечного размера $(1,4 \dots 1,6)$ мм, причём большую часть партий ленты отжигали в размере $3,2$ мм (холодная прокатка в 2 перехода). Отжиги выполняли в печах СГ310.56: промежуточный, в размере $3,2$ мм, - по режиму $620 \pm 10^{\circ}\text{C}$, 5 часов, а окончательный, в размере $(1,4 \dots 1,6)$ мм, - по режиму $600 \pm 10^{\circ}\text{C}$, 4 часа.

Формовку и высокочастотную сварку труб $\varnothing 27 \times 1,4(1,6)$ мм проводили на трубоэлектросварочном агрегате ТЭСА 15-50 по режиму: скорость 60 м/мин, частота 440 кГц (неблагоприятная для качества, см. табл. 1), напряжение и ток на аноде 10 кВ, 16 А. Непосредственно после сварки производили отбор образцов 142 партий труб для исследования микроструктуры⁸, окончательного контроля химического состава спектральным анализом и испытания на сплющивание по ГОСТ 8695-75. Дальнейшая обработка труб заключалась в волочении до конечного размера и окончательном отжиге в проходной печи, после чего следовало испытание готовых труб на герметичность под давлением на гидростенде. Экспертную оценку качества производили совместно несколько специалистов, основываясь на собственных визуальных осмотрах шва после испытания на сплющивание и следующих базовых представлениях: 1 - трещины обнаруживаются сразу после сварки и последующего сплющивания; 2 - дефекты обнаруживаются только на гид-

⁵ В работе участвовала Попова Н.С.

⁶ В работе участвовали Зырянов А.В., Колесников Н.Г., Попова Н.С., Русакова В.А., Никалёва В.Н., Михалёва Л.К.

⁷ В работе участвовала Харитоновна И.В.

⁸ В работе участвовала Машинина Л.В.

ростенде; 3 - идеальный шов. Для обработки полученных данных использовали опции программы Excel [17].

Исходные данные, используемые для множественного регрессионного анализа, представлены в таблице 2. Как видно из результатов статистического анализа влияния пяти рассматриваемых факторов (табл. 3), в отличие от предыдущего исследования (см. табл. 1) минимально-достоверное влияние оказывают толщина и количество переходов при холодной прокатке (низкие значения t-статистики Стьюдента и высокие Р-Значения). Это объясняется минимальным варьированием этих параметров в настоящем исследовании (см. табл. 2). В то же время видно чрезвычайно достоверное положительное влияние кремния и весьма достоверное негативное влияние свинца (Р-Значения, соответственно, 3,6E-12 и 0,027).

Таблица 2
Параметры технологии (h, k) и результаты контроля структуры (μ), содержания свинца и кремния, а также экспертной оценки качества 142 опытно-промышленных партий труб

h, мм	k	μ, мкм	Pb (0,001 %)	Si (0,001 %)	Оценка качества
1,4	2	50	15	480	5
1,4	2	40	21	130	5
1,4	2	45	17	22	3
1,6	2	40	11	4	1
1,4	2	40	11	400	5
1,4	2	50	20	190	5
1,4	2	50	12	370	5
1,4	2	45	20	450	5
1,4	2	40	14	330	5
1,4	2	40	11	6	3
1,4	2	40	14	170	5
1,4	2	45	11	5,5	3
1,4	2	55	9	7	3
1,4	2	40	12	400	5
1,4	2	45	18	100	5
1,4	2	55	14	3	2
1,4	2	32	14	7	2
1,4	2	35	23	28	2
1,4	2	35	15	52	2
1,4	2	27	17	10	2
1,4	2	27	15	27	2
1,4	2	50	13	7	2
1,4	2	35	20	82	2
1,4	2	50	16	8	2
1,4	2	35	15	4	2
1,4	2	70	18	4	2
1,4	2	40	13	51	2
1,4	2	80	16	4	2
1,4	2	40	18	4	2
1,4	2	50	12	3	2
1,4	2	46	16	73	5
1,4	2	50	12	120	5
1,4	2	55	14	51	5
1,4	2	40	13	50	5
1,4	2	40	12	77	5
1,4	2	50	12	83	5
1,4	2	50	14	50	5
1,4	2	40	20	270	5
1,4	2	45	15	210	5
1,4	2	50	16	150	5
1,4	2	32	12	45	5
1,4	2	17	12	280	5
1,4	2	27	12	230	5
1,4	2	20	16	240	5
1,4	2	27	16	70	5
1,4	2	25	14	100	5
1,4	2	32	13	250	5
1,4	2	32	14	74	5
1,4	2	50	20	210	5
1,4	2	27	18	76	5
1,4	2	30	15	400	5
1,4	2	35	15	70	5
1,4	2	27	17	380	5
1,4	2	27	16	130	5
1,4	2	50	14	130	5
1,4	2	50	17	130	5
1,4	1	35	12	220	5
1,4	2	35	12	47	5
1,4	1	25	14	180	5
1,4	1	15	14	260	5
1,4	1	35	14	240	5
1,4	1	50	17	210	5
1,4	1	25	14	290	5
1,4	1	27	15	250	5
1,4	1	32	15	320	5
1,4	1	35	16	280	5
1,4	2	35	14	76	5
1,4	2	35	14	62	5
1,4	2	35	12	66	5
1,4	2	32	25	290	5
1,4	2	25	14	260	5
1,4	2	30	12	330	5
1,4	2	27	14	410	5
1,4	2	30	13	240	5
1,4	2	26	14	171	5
1,4	2	28	7	4	5
1,6	2	30	6	5	5
1,4	2	50	15	480	5
1,4	2	40	21	130	5
1,4	2	45	17	22	3
1,4	2	55	14	3	2
1,4	2	32	14	7	2
1,4	2	35	23	28	2
1,4	2	35	15	52	2
1,4	2	27	17	10	2
1,4	2	27	15	27	2
1,4	2	50	13	7	2
1,4	2	35	20	82	2
1,4	2	50	16	8	2
1,4	2	35	15	4	2
1,4	2	70	18	4	2
1,4	2	40	13	51	2
1,4	2	80	16	4	2
1,4	2	40	18	4	2
1,4	2	50	12	3	2
1,4	2	46	16	73	5
1,4	2	50	12	120	5
1,4	2	55	14	51	5
1,4	2	40	13	50	5
1,4	2	40	12	77	5
1,4	2	50	12	83	5
1,4	2	50	14	50	5
1,4	2	40	20	270	5
1,4	2	45	15	210	5
1,4	2	50	16	150	5
1,4	2	32	12	45	5

Продолжение таблицы 2					
1,4	2	55	14	51	5
1,4	2	40	13	50	5
1,4	2	40	12	77	5
1,4	2	50	12	83	5
1,4	2	50	14	50	5
1,4	2	40	20	270	5
1,4	2	45	15	210	5
1,4	2	50	16	150	5
1,4	2	32	12	45	5
1,4	2	17	12	280	5
1,4	2	27	12	230	5
1,4	2	20	16	240	5
1,4	2	27	16	70	5
1,4	2	25	14	100	5
1,4	2	32	13	250	5
1,4	2	32	14	74	5
1,4	2	50	20	210	5
1,4	2	27	18	76	5
1,4	2	30	15	400	5
1,4	2	35	15	70	5
1,4	2	27	17	380	5
1,4	2	27	16	130	5
1,4	2	50	14	130	5
1,4	2	50	17	130	5
1,4	1	35	12	220	5
1,4	2	35	12	47	5
1,4	1	25	14	180	5
1,4	1	15	14	260	5
1,4	1	35	14	240	5
1,4	1	50	17	210	5
1,4	1	25	14	290	5
1,4	1	27	15	250	5
1,4	1	32	15	320	5
1,4	1	35	16	280	5
1,4	2	35	14	76	5
1,4	2	35	14	62	5
1,4	2	35	12	66	5
1,4	2	32	25	290	5
1,4	2	25	14	260	5
1,4	2	30	12	330	5
1,4	2	27	14	410	5
1,4	2	30	13	240	5
1,4	2	26	14	171	5
1,4	2	28	7	4	5
1,6	2	30	6	5	5
1,4	2	50	15	480	5
1,4	2	40	21	130	5
1,4	2	45	17	22	3
1,4	2	55	14	3	2
1,4	2	32	14	7	2
1,4	2	35	23	28	2
1,4	2	35	15	52	2
1,4	2	27	17	10	2
1,4	2	27	15	27	2
1,4	2	50	13	7	2
1,4	2	35	20	82	2
1,4	2	50	16	8	2
1,4	2	35	15	4	2
1,4	2	70	18	4	2
1,4	2	40	13	51	2
1,4	2	80	16	4	2
1,4	2	40	18	4	2
1,4	2	50	12	3	2
1,4	2	46	16	73	5
1,4	2	50	12	120	5
1,4	2	55	14	51	5
1,4	2	40	13	50	5
1,4	2	40	12	77	5
1,4	2	50	12	83	5
1,4	2	50	14	50	5
1,4	2	40	20	270	5
1,4	2	45	15	210	5
1,4	2	50	16	150	5
1,4	2	32	12	45	5

Продолжение таблицы 2					
1,4	2	17	12	280	5
1,4	2	27	12	230	5
1,4	2	20	16	240	5
1,4	2	27	16	70	5
1,4	2	25	14	100	5
1,4	2	32	13	250	5
1,4	2	32	14	74	5
1,4	2	50	20	210	5
1,4	2	27	18	76	5
1,4	2	30	15	400	5
1,4	2	35	15	70	5
1,4	2	27	17	380	5
1,4	2	27	16	130	5
1,4	2	50	14	130	5
1,4	2	50	17	130	5
1,4	1	35	12	220	5
1,4	2	35	12	47	5
Продолжение таблицы 2					

1,4	1	25	14	180	5
1,4	1	15	14	260	5
1,4	1	35	14	240	5
1,4	1	50	17	210	5
1,4	1	25	14	290	5
1,4	1	27	15	250	5
1,4	1	32	15	320	5
1,6	1	35	16	280	5
1,6	2	35	14	76	5
1,6	2	35	14	62	5
1,4	2	35	12	66	5
1,4	2	32	25	290	5
1,4	2	25	14	260	5
1,4	2	30	12	330	5
1,4	2	27	14	410	5
1,4	2	30	13	240	5
1,4	2	26	14	171	5
1,4	1	110	25	115	2
1,4	2	130	26	132	3

Таблица 3

Итоги линейного множественного регрессионного анализа влияния кремния, свинца, величины зерна и технологических факторов на качество сварки 142
опытно-промышленных партий труб

Регрессионная статистика						
R (коэфф. множественной корреляции)		R-квадрат (коэфф. детерминации)		Нормированный R-квадрат		Стандартная ошибка
0,631		0,399		0,377		1,020
ANOVA (таблица дисперсионного анализа)						
Источник вариации	df (число степ. свободы.)	SS (сумма квадратов)	MS (=SS/df)	Значимость F		
Обусловленный регрессией (р)	5	93,8	18,76	1,08E-13		
Относит. регрессии (остаток (о))	136	141,5	1,04			
Итого	141	235,3				
Результаты расчёта коэффициентов регрессии						
Исследуемые параметры	Коэфф. регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика (Стьюдента, для среднего)	P- Значение	Нижние и верхние границы коэфф. для доверит. вероятности 95%	
Y-пересечение	4,27	3,51	1,22	0,23	-2,67	11,21
Pb	-0,064	0,029	-2,24	0,027	-0,121	-0,0076
Si	0,0056	0,00074	7,634	3,6E-12	0,0042	0,0071
к	-0,029	0,264	-0,109	0,913	-0,55	0,493
h	0,44	2,369	0,184	0,854	-4,25	5,12
μ	-0,012	0,0063	-1,89	0,061	-0,024	0,00054

Таблица 4

Итоги линейного регрессионного анализа влияния величины зерна μ , а также содержания свинца и кремния в 0,001 масс. % на качество сварки 142 партий труб

R	R ²		R ² _H		Стандартная ошибка	Наблюдения
0,63	0,4		0,39		1,01	142
Источник вариации	df	SS	MS (=SS/df)	Отношение дисперсий F	Значимость F	
Регрессия (p)	3	93,7	31,3	30,5	3,5E-15	
Остаток (o)	138	141,6	1,03			
Итого	141	235,3				
Исследуемые параметры	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	t	P-Значение	Нижние и верхние границы коэффициентов для доверительной вероятности 95%	
Y-пересечение	4,84	0,43	11,28	2,5E-21	4	5,7
μ , мкм	-0,012	0,0062	-1,91	0,057	-0,024	0,0004
Pb	-0,065	0,028	-2,3	0,023	-0,12	-0,0093
Si	0,0057	0,0007	8,06	3,2E-13	0,0043	0,0071

С целью повышения достоверности модели и коэффициентов регрессии предлагается 18 исключение малозначимых факторов. Действительно, при исключении k и h повышается достоверность всей модели в целом («Значимость F» уменьшается почти на два порядка), а также точность определения и достоверность свободного члена регрессии (стандартная ошибка уменьшилась в ~ 9 раз, t-статистика увеличилась в ~ 9 раз, а P-Значение уменьшилась на ~ 20 порядков). Значения коэффициентов Стьюдента и P – вероятности и сами коэффициенты регрессии трёх рассматриваемых здесь факторов изменились несущественно. Для всех вариантов регрессионного анализа (см. табл. 3 и 4) максимальное значение t-статистики и минимальное P - Значение, отвечающие доверительной вероятности большей 99,999 %, получены для регрессии по кремнию.

Способ производства ленты из сплава Л68, предназначенной для трубосварки [19], основанный на модификации латуни кремнием (не менее 0,1 %), частично блокирующим вредное действие свинца, позволяет повысить допустимое содержание свинца до 0,02 % при величине зерна микроструктуры свариваемой ленты не более 100 мкм. При его использовании на КЗОЦМ годовая экономия составила 374386 руб. по курсу 2000-ых гг., из них 52 % - по литейному производству за счёт экономии материалов.

Заметим, что кремний известен как примесь, входящая в твердый раствор, под действием которой улучшаются процессы

пайки и сварки латуней [20], и что для лучшей свариваемости латуней часто сварку ведут с помощью присадочного материала из сплава Cu+3%Si [20]. Но использование присадки кремния для высокоскоростной непрерывной сварки, при которой все процессы нагрева и охлаждения в структуре сплава далеко не соответствуют процессам в статическом состоянии, было предложено впервые. Так, например, несмотря на свойственный кремнию самый высокий коэффициент Гийе [20, 21] нет оснований полагать, что структура сплава из однофазной перейдёт в двухфазную не только при содержании кремния 0,1 масс. %, но и при значительно больших его значениях, что подтверждают исследования структуры. Поэтому в нашем случае кремний, находясь в свободном состоянии, выполняет функцию, определяемую именно способом [19].

Опыт показал, что при плавке латуни Л68, предназначенной для трубного производства, идеальным компонентом шихты являются ломы из кремнийсодержащих сплавов типа ЛК, как правило, более чистых по примесям по сравнению, например, с латунью Л68. Использование их при плавке позволяет уменьшить общую сумму примесей в сплаве и предотвратить превышение её допустимого значения на последующих переделах.

Дальнейшее повышение допустимого содержания свинца возможно путём ограничения величины зерна [7]. Известно, что в результате высокоскоростных [22], в частности, непрерывных отжигов образуется мелкозернистая структура [23]. Как

следует из (1) [7], размер зерна < 20 мкм вполне достаточен, чтобы предотвратить трещинообразование, и наиболее быстрый отжиг проката нагревом в поперечном поле такую величину зерна, а значит, качество сварки вполне может гарантировать. Действительно, при индукционном отжиге латуни Л68 с последующим производством из неё труб образование поперечных трещин не отмечалось [24].

Заключение

1. Установлено, что целый ряд факторов (увеличение частоты индуктора, толщины свариваемой ленты, размера зёрен в её микроструктуре и увеличение содержания в ленте примесей ряда элементов, в особенности, свинца) способствуют образованию поперечных трещин. И, с другой стороны, введение промежуточного отжига при холодной прокатке и увеличение содержания в ленточной заготовке других примесей, в частности, марганца и особенно кремния препятствуют образованию трещин.

2. Разработанный и внедрённый способ превентивного контроля качества, основанный на отборе плавок, предназначенных для целенаправленной переработки в трубную заготовку по результатам контроля литой пробы, в современных производственно-экономических условиях не может широко использоваться.

3. Разработанный способ модификации сплава кремнием может быть мощным инструментом расширения допустимого содержания свинца и повышения качества сварных труб.

4. Сочетание модифицирующих добавок и непрерывного отжига ленточной заготовки гарантирует качество сварки при максимально допустимом содержании свинца.

Библиографический список

- ГОСТ 21646-2003. Трубы медные и латунные для теплообменных аппаратов. Технические условия. – Минск, Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. – 15 с.
- Рымов, В.А. Совершенствование производства сварных труб / В.А. Рымов, П.И. Полухин, И.Н. Потапов. - М. : Metallurgy, 1983. - 313 с.
- Tomlinson, P. Tube welding by induction / P. Tomlinson // Tube Int. - 1989. - V. 8. - № 6. - P. 307-310.
- Kazano, W. Copper and brass tubes from strip / W. Kazano, B. Beszak, A. Karbownik // Tube Int. – 1989. – V. 8. – № 2. – P. 90-92, 94.
- Пат. 4916853 США, МКИ 4 В 23 К 31/06; НКИ 228/147. Способ производства сварных труб / Matsut Shigetomo, Hasegawa Hisao. - Заявл. 30.06.87, № 68183; Опубл. 17.04.90.
- ГОСТ 15527-2004. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки. – Минск, Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. – 9 с.
- Кожин, В.Д. Предотвращение трещинообразования при трубосварке на Кировском заводе ОЦМ / В.Д. Кожин, Л.Ю. Лужбина, М.З. Певзнер // Цветные металлы. - 1990. - № 12. - С. 83-84.
- Устранение растрескивания латуни при высокочастотной сварке труб / Ю.Ф. Шевакин, Б.Н. Ефремов, Л.Н. Пинус, Ю.К. Дозорцев // Цветные металлы. - 1989. - № 12. - С.81-84.
- Попович, В.В. Механизмы жидкометаллического охрупчивания / В.В. Попович // ФХММ. – 1979. - Т. 15. - № 5. - С. 11-18.
- Ефремов, Б.Н. Структурные причины высокотемпературного разрушения свинцовых латуней / Б.Н. Ефремов, Е.В. Юшина, С.Н. Платова, С.Д. Васильев, М.И. Лаврентьев // Изв. вузов. Цветная металлургия. - 1988. - № 4. - С. 101-104.
- Певзнер, М.З. Анализ влияния технологических факторов на образование трещин при сварке латунных труб / М.З. Певзнер // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 2005. - № 2. – С. 71-75.
- Певзнер, М.З. Разработка технологий производства ленты латуни Л68, стойкой к образованию поперечных трещин при трубосварке / М.З. Певзнер // Производство проката. – 2013. - № 10. - С. 17-25.

13. Заявка 59-126742, Япония, МКИ С 22 С 9/04. Медный сплав для сварных труб / Каваути Сусуму, Цудзи Масахиро, Ямамото Митиаки, Нисикава Киёаки. - Заявлено 07.01.83, № 58-474; опубл. 21.07.84.
14. Заявка 59-126743, Япония, МКИ С 22 С 9/04. Медный сплав для сварных труб / Каваути Сусуму, Цудзи Масахиро, Ямамото Митиаки, Нисикава Киёаки. - Заявлено 07.01.83, № 58-475, опубл. 21.07.84.
15. Патент ДСП № 1730852 СССР, МКИ С 21 D 1/26. Способ термической обработки ленты из латуни Л68 / Н.М. Широков, В.Д. Кожин, М.З. Певзнер, Л.Ю. Лужбина, С.А. Певзнер. - № 4760910/02; Заявл. 19.06.89. Бюл. изобретений. - 1993. - № 33-36. - С. 191.
16. Певзнер, М.З. Управление непрерывным производством проката в контексте направлений, регламентируемых ГОСТ 11462-1 / М.З. Певзнер // Менеджмент в России и за рубежом. - 2010. - № 6. - С. 60-66.
17. Козлов, А.Ю. Статистический анализ данных в MS Excel : учебное пособие / А.Ю. Козлов, В.С. Мхитарян, В.Ф. Шишов. - М. : ИНФРА-М, 2012. - 320 с.
18. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 816 с.
19. Патент № 2290271 РФ, МПК В 21 В 3/00, С 22 F 1/08. Певзнер М.З. Способ производства ленты из сплава Л68, предназначенной для трубосварки. - Заявлено 16.06.2004, № 2004118326/02; Опубл. 10.01.2006.
20. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки : Справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Фёдоров. - М. : Машиностроение, 2004. - 336 с., ил.
21. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди : Справочник. - М. : Наука, 1979. - 248 с.
22. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капусткина : 3-е изд. - М. : МИСИС, 2005. - 432 с.
23. Певзнер, М.З. Индукционный отжиг цветного проката: итоги внедрения и перспективы развития / М.З. Певзнер // Производство проката. - 2011. - № 11. - С. 28-38.
24. Широков, Н.М. Свойства латунной заготовки после индукционного отжига / Н.М. Широков, В.А. Крутилин, М.З. Певзнер, В.В. Белинский, Е.В. Луценко // Цветные металлы. - 1986. - № 7. - С. 87-89.

Information about the paper in English

M.Z. Pevzner, S.P. Grachev,
K.V. Ivanov-Polsky,
E.A. Kuimov, S.A. Smertin
 Vyatka State University (VyatSU),
 Kirov, Russian Federation
 E-mail: mikhailpevzner@yandex.ru
 Received 15.05.2018

QUALITY OF HIGH-FREQUENCY WELDING OF BRASS PIPES

Abstract

The paper presents a statistical analysis of the chemical composition, structure, parameters of the technology and final quality of 257 pilot batches of pipes from L68 alloy, manufactured by continuous forming and high-frequency welding. The authors determined a set of factors decreasing a negative influence of characteristic detrimental lead impurities on the quality of welding. It was suggested and proved by experiments that the welding quality was improved by increasing silicon content in brass.

Keywords: pipe welding, brass pipes, high-frequency welding, welded pipe billet, silicon brass.
