

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ В ВАКУУМЕ СЛОИСТЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТИПА МЕДЬ-СТАЛЬ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

*Н.И. Ильченко, С.Ю. Диденко, И.М. Неклюдов, С.Л. Бондаренко
ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина*

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса получения композиционных материалов типа сталь-медь по методу горячей прокатки в вакууме и электрофизических свойств этих материалов. Выявлено влияние объемной доли меди в композите на кинетику роста температуры образцов при их индукционном нагреве. Изучена зависимость электросопротивления композитов от объемной доли меди в этих материалах.

Удачное сочетание технически ценных свойств позволяет считать медь важнейшим металлом высокой проводимости. Наряду с имеющимися преимуществами: низкое удельное сопротивление, хорошая технологичность, стойкость к воздействию окружающей атмосферы, относительная легкость в пайке и сварке, медь имеет и недостатки: недостаточно высокая механическая прочность и дефицитность.

В связи с развитием промышленности и энергетики, несмотря на рост производства меди, вопросы её замены биметаллическими и композиционными материалами, а также экономии не утратят своей актуальности в будущем.

Цель работы: получение методом горячей прокатки в вакууме (ГПВ) слоистых и композиционных

материалов типа Ст-Сu с повышенными механическими свойствами и низким удельным электросопротивлением.

Биметалл и композит типа Ст-Сu. получены на опытно-промышленной установке СВАПП-1, оснащенной узлом индукционного нагрева с частотой 2,4 кГц. [1] В качестве исходных компонент материалов использовались сталь марки Ст.3 и медь марки М1. Исходный биметаллический пакет состоял из двух слоев, а композит – из стально-медной стружки, предварительно спрессованной на прессе. Толщина исходных компонент пакетов и конечных материалов приведена в табл. 1, 2.

Таблица 1

Толщина исходных компонент в пакете и толщина слоев в биметалле; соответственно их объемные доли

Номер пакета	Составляющая биметалла	Толщина в исх. пакете, мм	Объемная доля в исх. пакете, %	Толщина в конечном биметалле, мм.	Объемная доля в кон. Биметалле, %
1	сталь	12,0	55	0,64	64
	медь	10,0	45	0,36	36
	общая	22,0	100	1,0	100
2	сталь	14,0	65	0,76	75
	медь	8,0	35	0,24	25
	общая	22,0	100	1,0	100
3	сталь	16,0	75	0,84	84
	медь	6,0	25	0,16	16
	общая	22,0	100	1,0	100

Таблица 2

Толщина исходных брикетов и композитов. Объемное содержание медной составляющей в композите

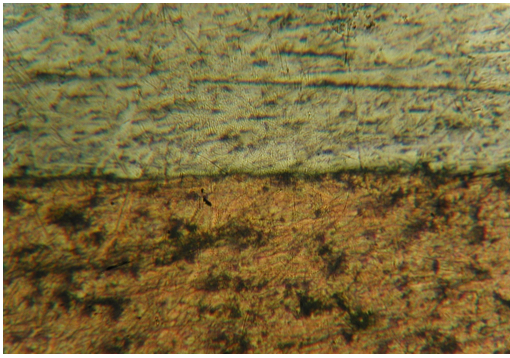
Номер пакета	Вес.содерж. Сu в брикете, г	Вес.сод.Ст в брикете, г	Исх. толщ. прес. брикета, мм	Толщ.комп., мм	Объемная доля Сu в композите, %
1	200	800	30	6,3	18
2	300	700	30	6,3	27
3	400	600	28	5,5	37
4	500	500	26	5,5	46

Указанные выше исходные биметаллические пакеты и композиционные брикеты были прокатаны при одних и тех же технологических параметрах по методу горячей прокатки в вакууме (ГПВ) с использованием индукционного нагрева.

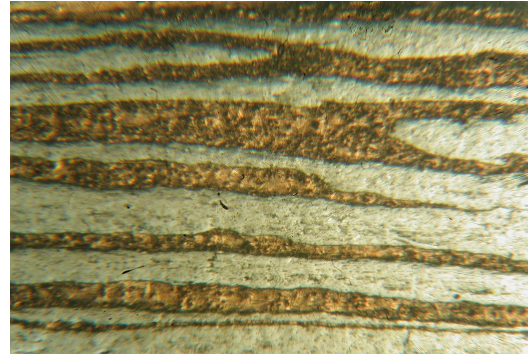
Основные контролируемые и управляемые технологические параметры сварки совместной прокаткой для биметалла и композита:

- 1) время нагрева заготовок 5 мин
- 2) напряжение на индукторе $U=0,2$ кВ
- 3) величина относительной деформации 30...40 %
- 4) давление в рабочем объеме 10^{-2} Па
- 5) температура прокатки 900°C.

Структуры биметалла и композита изображены на рис.1. Все металлографические исследования проводились с использованием методов оптической металлографии.



а)



б)

Рис.1. Структура и граница раздела: а – биметалла; б – композиционного материала

Полученные нами материалы (биметалл и композит) с различным объемным содержанием медной составляющей были подвергнуты индукционному нагреву при различных напряжениях на индукторе ($U=0,2...0,5$ кВ). Размеры образцов: $5 \times 80 \times 250$ мм. Для измерения температуры образцов применяли хромель-алюмелевые термопары с диаметром электродов 0,5 мм.

Изменение температурно-временной зависимости при индукционном нагреве очень важно, с точки зрения ее влияния на свойства (повышение температуры фазовых превращений, увеличение прочности, твердости и т.д.) тех материалов, которые были подвержены индукционному нагреву. При нагреве биметалла и композита нас интересует, как в зависимости от объемной доли меди и конструктивных особенностей этих материалов изменится скорость нагрева, так как она является основным фактором, влияющим на производительность промышленной установки СВАПР-1, оснащенной узлом индукционного нагрева.

По результатам проведенного эксперимента был построен график зависимости индукционного нагрева исследуемых образцов, а также их исходных компонент (рис.2).

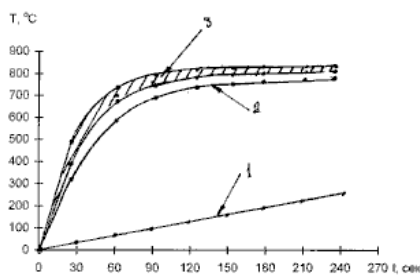


Рис.2. Температурно-временная зависимость индукционного нагрева образцов при напряжении на индукторе $U=0,2$ кВ:

1 – Ст; 2 – ст.3; 3 – область нагрева (биметалла и композита) с содержанием от 20 до 50% Си

Анализ графика нагрева биметалла и композита типа Ст-Си (см. рис.2) показал, что наличие (несмотря на конструктивные особенности) меди (в пределах 20...50 об. ед.) как в биметалле, так и в композите приводит к тому, что скорость нагрева (tg угла наклона) возрастает $v=14^\circ\text{C}/\text{с}$ (см. рис. 2, заштрихованная область 3) по сравнению со сталью

(см. рис. 2, кривая 2) и равна $v=10^\circ\text{C}/\text{с}$. Необходимо также отметить, что и конечная температура нагрева выше у исследуемых материалов $T_k=800^\circ\text{C}$ по сравнению со сталью $T_k=720^\circ\text{C}$. После 60 с скорость нагрева как Ст.3, так и исследуемых материалов падает до $V \approx 5^\circ\text{C}/\text{с}$. Уменьшение скорости нагрева связано с потерей сталью магнитных свойств, что незамедлительно сказывается на уменьшении потребляемой мощности. При индукционном нагреве мощность можно рассматривать как:

$$P \approx k \sqrt{\mu \rho},$$

и называется она фактором мощности. Здесь k – коэффициент, отвечающий за геометрические размеры образца; μ – магнитная проницаемость материала; ρ – удельное электросопротивление.

Таким образом, можно сказать, что нагрев от 60 с и более происходит только в результате роста удельного электросопротивления, а оно, как известно, увеличивается с ростом температуры как для стали, так и для меди (составляющих биметалл и композит). Продолжительность нагрева (240 с), несмотря на незначительное повышение температуры, необходима для выравнивания градиента температур между поверхностью образца и его центральной частью. Градиент (разность температуры) возникает в связи с неравномерностью распределения переменного тока по сечению при индукционном нагреве. Наибольшая плотность тока наблюдается на поверхности образца [2,3]. Нагрев более 240 с не эффективен, так как количество потребляемой мощности ($P \approx \sqrt{\rho}$) равно количеству тепловых потерь (теплоотдачи) исследуемых материалов (индуктор без футеровки). Наличие меди в биметалле (плакирование) и композита (механическая смесь) улучшает тепловой процесс при индукционном нагреве, что, в свою очередь, отразилось на увеличении скорости нагрева и конечной температуре нагрева данных материалов. Другими словами, у биметалла и композита по сравнению со сталью выше коэффициент температуропроводности [4]:

$$a = \lambda / C_p,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; C_p – объемная теплоемкость.

Подробный анализ индукционного нагрева слоистых и композиционных материалов типа Ст-Си показывает эффективность использования опытно-

промышленной установки СВАПР-1 при их производстве.

При замене медных токопроводящих изделий другими материалами неизменным остается требование к удельному сопротивлению материала: оно должно не намного превышать ρ -чистой меди ($\rho = 0,017$ мкОм·м) [5]. В связи с этим в данной работе было измерено удельное сопротивление полученных материалов методом 4-х контактов на образцах размерами 1×7×200 мм [6].

На рис.3 показана зависимость изменения удельного электросопротивления (ρ) биметаллов (см. кривая 1) и композита (см. кривая 2) от объемной доли меди в этих материалах после холодной деформации (ХД) – более 60% суммарного обжатия. При малом содержании медной составляющей (до 15 об.ед.) электрическое сопротивление биметалла и композита практически не отличается. В этом случае основной вклад в значение удельного электросопротивления вносит стальная компонента.

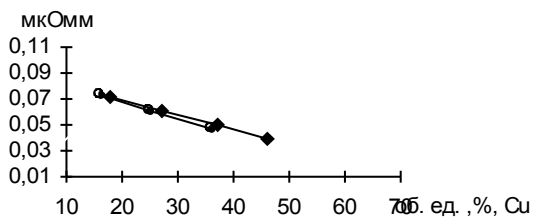


Рис.3. График зависимости изменения удельного электросопротивления от величины объемной доли медной составляющей в биметаллическом и композиционном материалах:

—●— биметалл; —◆— композит

По мере увеличения объемной доли меди в исследуемых образцах значение удельного электросопротивления уменьшается и приближается к значению удельного сопротивления чистой меди. Разница в электросопротивлении биметалла и композита при объемных долях от 20 до 40% связана с конструктивными особенностями исследуемых материалов. Т.е. электросопротивление вдоль оси слоев биметалла меньше, чем в хаотично расположенном композите. Другими словами,

чем больше границ раздела, тем больше потерь электросопротивления [7,8].

ВЫВОДЫ

1. Разработана технология получения слоистых и композиционных материалов типа Ст-Cu методом горячей прокатки в вакууме с использованием индукционного нагрева с частотой 2,4 кГц на опытно-промышленной установке СВАПР.
2. Исследовано изменение скорости нагрева полученных материалов при различных напряжениях на индукторе ($U=0,2...0,5$ кВ) в зависимости от объемной доли меди и конструктивных особенностей материала.
3. Показано изменение удельного электросопротивления полученных материалов от объемной доли меди.
4. Показана эффективность индукционного нагрева материалов типа Ст-Cu при различных напряжениях на индукторе ($U=0,2...0,5$ кВ) с содержанием медной составляющей до 50 об.ед.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, С.Ю. Диденко, Н.И. Ильченко и др. Прокатка в вакууме-перспективный метод получения материалов // *Белгородские ведомости*. 1997, № 9, с. 36–43.
2. И.И. Безручко. *Индукционный нагрев для объемной штамповки*. Л., 1987, с. 11–16.
3. Е.Н. Николаев, И.М. Коротин. *Термическая обработка металлов токами высокой частоты*. М.: "Высшая школа", 1984, с. 57–65.
4. М.А. Михеев, И.М. Михеева. *Основы теплопередачи*. М.: "Энергия", 1973, с. 204.
5. *Справочник по электротехническим материалам*. Т.3 /Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Л.: "Энергоатомиздат", 1988, с. 197–202.
6. В.С. Ляровский и О.Б. Мурадян. *Электрические соединители*: Справочник. М.: "Радио и связь", 1988, с. 15–16.
7. *Композиционные материалы*: Справочник /Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: "Наукова думка", 1985, с. 59–62.
8. *Композиционные материалы с металлической матрицей* /Под ред. К. Крейдер /М.: "Машиностроение", 1987, т. 4., с. 74–75.

ОДЕРЖУВАННЯ МЕТОДОМ ГОРЯЧОЇ ПРОКАТКИ У ВАКУУМІ ШАРЧАСТИХ ТА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТИПУ СТАЛЬ-МІДЬ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Н.І. Ильченко, С.Ю. Діденко, І.М. Неклюдов, С.Л. Бондаренко

Наведені результати експериментальних досліджень процесу одержання композитних матеріалів типу сталь-мідь методом горячої прокатки у вакуумі та електрофізичних властивостей цих матеріалів. Виявлено вплив об'ємної частки міді в композиті на кінетику росту температури образців при їх індукційному нагріві. Вивчена залежність електроопору композитів від об'ємної частки міді у цих матеріалах.

THE STEEL-COPPER COMPOSITES PRODUCTION METHOD BY THE HOT VACUUM ROLLING AND RESEARCHES THEIR CHARACTERISTICS

N.I. Ichenko, S.U. Didenko, I.M. Nekludov, S.L. Bondarenko

The results of experimental researches of the steel-copper composite production process by the hot vacuum rolling and electrophysical characteristics these materials are presented. The influence of the copper volume fraction values in composite on the sample temperature kinetic during induction heating is revealed. The composite electroresistance dependence from the copper volume fraction values has been study.