

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА (МСК) НА ОСНОВЕ СТАЛИ 3 И МЕДИ М1

**В.Н. Воеводин, Н.И. Ильченко, А.Ю. Ростова, Е.А. Крайнюк, О.Н. Ильченко**  
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина  
E-mail: [ilchenko\\_ni@ukr.net](mailto:ilchenko_ni@ukr.net)

Изучено влияние предварительной термической обработки на твердость, ударную вязкость и прокаливаемость металлического слоистого композита на основе стали 3 и меди М1. Были проведены исследования микроструктуры полученных композитов.

### ВВЕДЕНИЕ

Применение металлических слоистых композитов (МСК) из разнородных металлов в конструкциях, испытывающих действия повышенных динамических нагрузок и температур, требует изучения особенностей разрушения металлического слоистого композита после различных термических обработок:

- отжига;
- закалки плюс отпуск.

Изучению закономерностей влияния термообработки на механические свойства и микроструктуру посвящено немало работ, но лишь для определенных марок сталей. Для МСК закономерности влияния изучены недостаточно. Работы чаще посвящены наноразмерным толщинам (менее 50 мкм) [1–6].

Предъявляемые требования к изделиям из металлических слоистых композитов предполагают разработку МСК с улучшенным комплексом физико-механических свойств. Последние во многом зависят от исходных компонент, их объемной доли, растворимости друг в друге, образования интерметаллидов, фаз и т. д., характера и закономерностей формирования структуры металлов, особенно в зоне их соединения [1, 7, 8].

Целью данной работы является изучение механических свойств и структуры МСК на основе стали 3 и меди М1 после различных температурных режимов термообработок.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе испытывали образцы МСК, состоящего из семи слоев на основе стали 3 и меди М1 (таблица), которые получены методом горячей прокатки в вакууме [9, 10].

Химический состав и механические свойства исходных материалов в МСК

Материал	Свойства										
	C	Si	Mn	Твердость по Виккерсу, $\frac{кг}{мм^2}$	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Ударная вязкость KCV, $\frac{Дж}{см^2}$	Пластичность, %	Толщина, мкм	Количество слоев	Объемная доля, %
Сталь 3	0,14... 0,22	0,12... 0,30	0,4... 0,65	179	450	250	108	30	2100	4	86
Медь М1	–	–	–	86,7	250	110	170	56	400	3	14

Технологический цикл получения МСК включал сварку в вакууме, отжиг при 850 °С (1 ч) и холодную деформацию.

В качестве исходных составляющих использовали взаимно нерастворимые друг в друге компоненты – сталь 3 и медь. На рис. 1 показаны образцы Шарпи с V-образным надрезом.

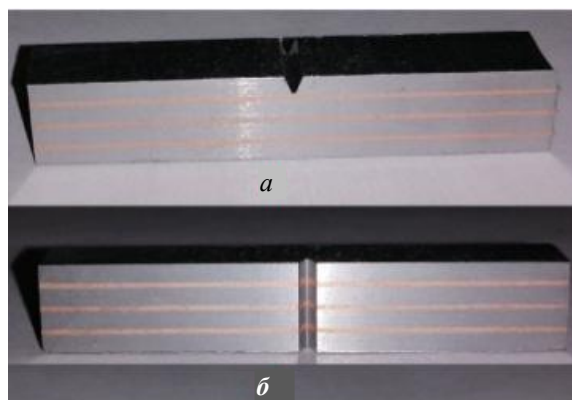


Рис. 1. Общий вид образцов стали 3–меди М1 для испытаний по Шарпи:

*a* – параллельно слоям (торможение распространения трещины);

*б* – перпендикулярно слоям (разветвление трещины)

Образцы в сечении 9,5×9,5 мм длиной 55 мм в средней части имели надрез глубиной 2 мм с радиусом в основании 0,25 мм. Испытания проводились на моторизованном маятниковом копре INSTRON, модель S1-1M. Концентратор напряжений типа V наносили при помощи моторизованного станка для нанесения надрезов на заготовке образцов по Шарпи и Изоду. Производитель – RJW Ltd., модель – 1W-CN B34.

Испытуемые образцы предварительно заливались в бакелит на заливном прессе LECO PR 4 X, после подготавливались шлифы на шлифовально-полировальной установке LECO GPX 300.

Исследуемая ударная вязкость и порог хладноломкости показывают значения вязкости и характеризуют надежность конструкционного материала. Образцы из МСК были подвержены различным термообработкам:

- 700 °С – 2 ч (низкий отжиг, остывание в печи);
- 750 °С – 2 ч (неполный отжиг, остывание в печи);
- 850 °С – 2 ч (полный отжиг, остывание в печи);
- закалка 850 °С в воду плюс отпуск при 170 °С в течение 1 ч.

После термической обработки образцы испытаны на ударную вязкость. Дополнительно приведены металлографические исследования структуры после каждой термообработки, определена микротвердость и средний размер зерна.

Твердость образцов измерялась на полуавтоматическом микротвердомере LECO LM-700 АТ при нагрузке 50 г с выдержкой 14 с. Расстояние между уколами составляло три длины диагонали отпечатка. Структура образцов исследовалась на инверсионном металлографическом микроскопе OLYMPUS GX 51 при увеличении  $\times 50 \dots \times 200$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

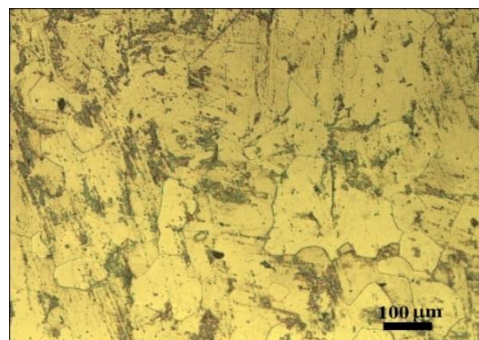
При анализе экспериментальных данных прочности МСК на основе стали 3 и меди М1, следует обратить особое внимание на изучение кинетики деформирования и разрушения этого класса материалов при различных температурах обработки. Предполагается, что результаты изучения кинетики разрушения, во многом зависящие от диффузии и адгезионных процессов, образования фаз и интерметаллидов на границе раздела компонент, дадут новую информацию не только о физике прочности МСК, но и о разрушении «гетерогенных» твердых тел [11, 12].

Металлографические исследования показали, что сталь 3 в МСК после отжигов при 700 °С (2 ч), 750 °С (2 ч) и 850 °С (2 ч) имеет ферритоперлитную структуру. При этом средний размер зерна при отжиге 700 °С (2 ч) – 62 мкм, 750 °С (2 ч) – 67 мкм, 850 °С (2 ч) – 66,5 мкм (рис. 2).

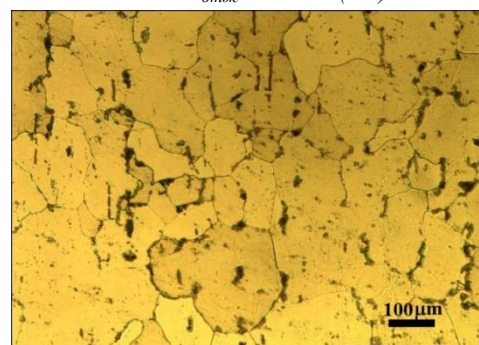
Определения соотношения перлита и феррита после различных режимов термообработки осуществляли по эталону микроструктуры ГОСТ 8233-56. При температуре отжига 700 °С (2 ч) соотношение перлита к ферриту 20:80; при 750 °С (2 ч) – 5:95; при 850 °С (2 ч) – 35:65.

Феррит – твердый раствор углерода  $\alpha$ -Fe, пластичный (твердость ~ 80 НВ), в виде светлых зерен (см. рис. 2). Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита (твердость ~ 160...260 НВ), темная составляющая.

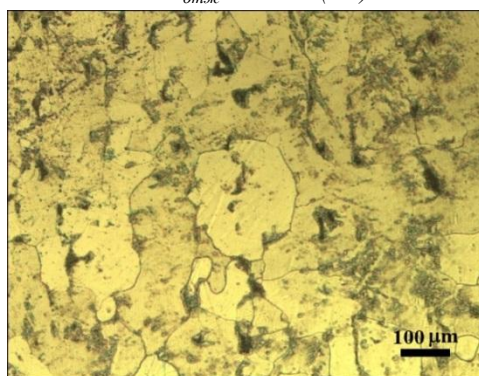
Увеличение среднего размера зерна и изменения соотношения феррита к перлиту в стали 3 являются, на наш взгляд, основными факторами, влияющими на ударную вязкость при данных режимах термообработки. Значение ударной вязкости в образцах с надрезом параллельно слоям (торможение распространения трещины) несколько выше, чем в образцах – перпендикулярно слоям (разветвление распространения трещины) (рис. 3).



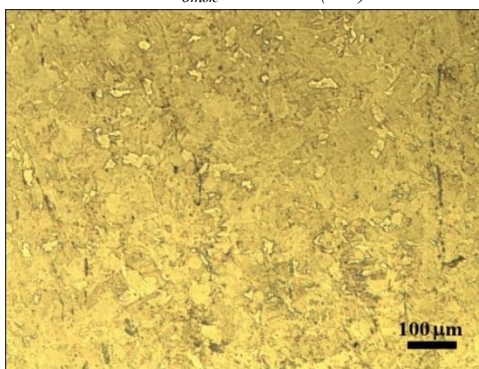
*a –  $T_{отж}$  = 700 °С (2 ч)*



*б –  $T_{отж}$  = 750 °С (2 ч)*



*в –  $T_{отж}$  = 850 °С (2 ч)*



*г –  $T_3$  = 850 + 170 °С (1 ч)*

*Рис. 2. Микроструктура стали 3 после различных термообработок*

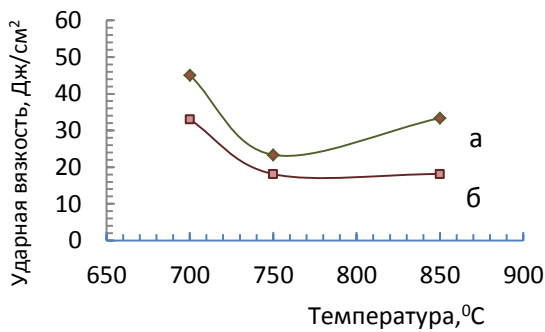


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости  $a_n$  от температуры отжига при надрезах торможения распространения (а) и разветвления трещины (б)

Наряду с ростом зерна, при увеличении температуры отжига и происходящими диффузионными процессами образования твердых растворов микротвердость является не менее важной характеристикой при испытаниях на ударную вязкость [13], а в случае с МСК – также и прокаливаемость (рис. 4). Микротвердость стали 3 после отжига при разных температурах (700, 750 и 850 °C – 2 ч) практически одинакова и изменяется в пределах 91...108 кг/мм<sup>2</sup> во всех слоях (см. рис. 4, кривая 1).

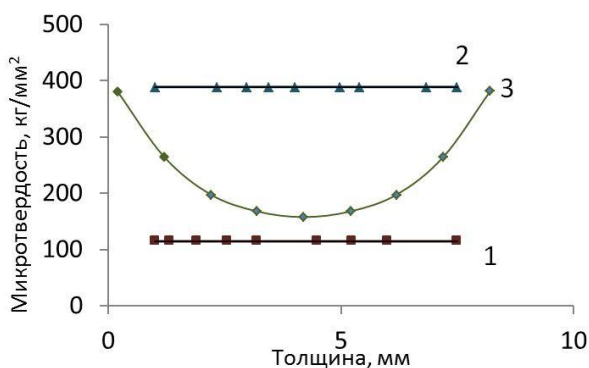


Рис. 4. Микротвердость по толщине образца: 1 – отжиг при 750 °C (2 ч, остывание в печи) – образец МСК; 2 – закалка при 850 °C в воду плюс отпуск при 170 °C (1 ч) – образец стали 3; 3 – закалка при 850 °C в воду плюс отпуск при 170 °C (1 ч) – образец МСК

Испытания образцов после двойной термообработки (закалка при 850 °C в воду) плюс отпуск при 170 °C (1 ч) на ударную вязкость имели значение ударной вязкости на уровне  $a_n = 160$  Дж/см<sup>2</sup> при надрезах торможения распространения трещины и 77 Дж/см<sup>2</sup> при надрезах разветвления трещины. При этом микротвердость HV составила 400 кг/мм<sup>2</sup>, структура мартенситная, мелкозернистая, границы зерен отсутствуют (см. рис. 2,г).

Прокаливаемость МСК на основе стали 3 и меди М1 такая, как у габаритных деталей, – на поверхности твердость больше, а к центру меньше. Образцы стали 3 тех же размеров прокаливались насквозь (см. рис. 4, кривая 2). Образцы из МСК за счет медных прослоек прокаливались хуже (медные прослойки уменьшают скорость охлаждения при

закалке). В центре образцы имели пониженные значения микротвердости (см. рис. 4, кривая 3), что также повлияло на значение ударной вязкости. Это необходимо учитывать при изготовлении изделий из МСК с последующей (если необходимо) закалкой.

## ВЫВОДЫ

Термообработка при 850 °C (закалка в воду плюс отпуск при 170 °C в течение 1 ч) является наиболее оптимальной, поскольку при данной температуре наблюдается повышенное значение механических свойств ( $a_n = 160$  Дж/см<sup>2</sup>, HV = 400 кг/мм<sup>2</sup>). После такой обработки ударная вязкость для МСК превышает значения ударной вязкости для стали 3 на 20%.

1. Значение ударной вязкости МСК на основе стали 3 и меди М1, состоящих из семи слоев с объемной долей меди 14%, при различных режимах термообработки (отжиг при разных температурах) существенным образом зависит от соотношения феррита к перлиту в микроструктуре стали 3 (объемная доля 86%), а также от среднего размера зерна (феррита).

2. Микротвердость образцов металлических слоистых композитов на основе стали 3 (четыре слоя) и меди М1 (три слоя) после двойной термообработки (закалка при 850 °C в воду плюс отпуск при 170 °C (1 ч)) уменьшается от поверхности (400 кг/мм<sup>2</sup>) к середине образца (150 кг/мм<sup>2</sup>).

3. После двойной термообработки (закалка при 850 °C в воду плюс отпуск при 170 °C (1 ч)) сталь 3 имеет мартенситную микроструктуру, границы зерен отсутствуют.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. І.М. Неклюдов, В.М. Восводін, С.Ю. Діденко, М.І. Ільченко та інші. Наноструктуровані мікроламінати мідь-сталь: отримання та механічні властивості // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2011, №3, с. 85-88.
2. Ch. Ding, J. Xu, D. Shan, B. Guo, T. Langdon. Sustainable fabrication of Cu/Nb composites with continuous laminated structure to achieve ultrahigh strength and excellent electrical conductivity // *Composites Part B: Engineering*. 2021, v. 211, p. 108662.
3. S. Zheng, I. Beyerlein, J. Carpenter, et al. High-strength and thermally stable bulk nanolayered composites due to twin-induced interfaces // *Nat Commun*. 2013, N 4, p. 1696.
4. S. Satyam et al. Texture and Microstructure Evolution during Cold Rolling of Cu-Fe Laminates Prepared by Accumulative Roll Bonding // *Materials Science Forum*. 2012, v. 715-716, Trans Tech Publications, Ltd., p. 170-170.
5. А.П. Гуляев. *Металловедение*. М.: «Металлургия», 1986, с. 544.
6. В.Р. Регель Проблемы физики композиционных материалов // *Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по физике прочности и пластичности металлов и сплавов*. Куйбышев, 1976, с. 66-69.



7. Б.С. Бокштейн, В.И. Внуков, Е.В. Голосов, М.И. Карпов. Структура и диффузионные процессы в слоистых композитах системы Cu-Ti // *Известия вузов*. 2009, №8, с. 60-65.

8. С.В. Гладковский, Т.А. Трушина, Е.А. Ковихин. Прочность и разрушения металлических композитов на основе меди М1 и стали 20 // *Машиностроение*. 2010, с. 321-325.

9. С.Ю. Діденко, М.І. Ільченко, Н.Р. Рибальченко. Вакуумна прокатка: методи та перспективи розвитку. *Сборник «Академік Віктор Євгенійович Іванов»*. 2002, с. 115-127.

10. И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, С.Ю. Диденко и др. Механические свойства и структура микроламинатов системы медь-железо // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2010, №5, с. 89-94.

11. В.А. Белошенко, В.Н. Ворохин, В.Ю. Дмитренко. Волокнистые Cu-Fe-композиты, получение методом пакетной гидроэкструзии, структура, механические и резистивные свойства // *Физика и техника высоких давлений*. 2010, №3, с. 110-119.

12. М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.И. Внуков. Механические свойства многослойных композитов со слоями наноразмерной толщины // *Деформация и разрушение материалов*. 2010, №12, с. 36-40.

13. М.Г. Лозинский, А.И. Тананов, А.М. Соколов. Некоторые вопросы микромеханики разрушения плакированных слоистых металлических композиций // *Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по физике прочности и пластичности металлов и сплавов*. Куйбышев, 1976, с. 69-70.

*Article received 27.05.2021*

### **ВПЛИВ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМООБРОБКИ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ МЕТАЛЕВОГО ШАРУВАТОГО КОМПОЗИТУ (МШК) НА ОСНОВІ СТАЛІ 3 І МІДІ М1**

**В.М. Восводін, М.І. Ільченко, Г.Ю. Ростова, Є.О. Крайнюк, О.М. Ільченко**

Вивчено вплив попередньої термічної обробки на твердість, ударну в'язкість і прогартовуваність металевго шаруватого композиту на основі сталі 3 і міді М1. Були проведені дослідження мікроструктури отриманих композитів.

### **EFFECT OF VARIOUS HEAT TREATMENT REGIMES ON THE IMPACT ELASTICITY OF A METAL LAYERED COMPOSITE (MLC) BASED ON STEEL 3 AND COPPER M1**

**V.N. Voyevodin, N.I. Ilchenko, A.Yu. Rostova, Y.A. Krainyuk, O.N. Ilchenko**

The effect of preliminary heat treatment on hardness, impact elasticity and hardenability of a metal layered composite based on steel 3 and copper M1 was studied. Studies of the microstructure of the obtained composites were carried out.