

Список используемых источников

1. Yu H. et al. Bionic design of tools in cutting: Reducing adhesion, abrasion or friction // Wear. 2021. Vol. 482–483.
2. Huang W. et al. Optimization design and experimental analysis of bionic viscosity reduction of chisel type energy saving subsoiling shovel // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1635. – №. 1. – С. 012036.
3. Li B., Chen Y., Chen J. Modeling of soil–claw interaction using the discrete element method (DEM) // Soil and Tillage Research. – 2016. – Т. 158. – С. 177–185.
4. Yu, H., Han, Z., Zhang, J., & Zhang, S. (2021). Bionic design of tools in cutting: Reducing adhesion, abrasion or friction. Wear, 203955.
5. Amara M. et al. Effect of sand particles on the Erosion-corrosion for a different locations of carbon steel pipe elbow // Procedia Structural Integrity. Elsevier B.V., 2018. Vol. 13. P. 2137–2142.

УДК 621.791.722

Е.В. Терентьев, Х.М. Козырев, К.Т. Бородавкина, Д.В. Шишкин
"НИУ МЭИ"
Москва, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТАЛЬ-ТИТАН МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СЛОЕВ ИЗ МЕДИ И НИОБИЯ

***Аннотация.** Работа посвящена получению конструкции «титан-сталь» через слои ниобия и меди. Проведено металлографическое исследование. Построено распределение твердости. Отмечены технологические сложности наплавки ниобия на титан, а также стали на медь. Получено временное сопротивление конструкции на уровне меди.*

E.V. Terentyev, K.M. Kozyrev, K.T. Borodavkina, D.V. Shishkin
National Research University "MPEI"
Moscow, Russia

PRODUCING OF COMBINED STEEL-TITANIUM STRUCTURE BY ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING USING INTERMEDIATE LAYERS OF COPPER AND NIOBIUM

***Abstract.** The work is devoted to obtaining the "titanium-steel" structure through layers of niobium and copper. Metallographic research was carried out. The hardness distribution is constructed. The technological difficulties of surfacing niobium on titanium, as well as steel on copper, are noted. The temporary resistance of the structure at the level of copper is obtained.*

На сегодняшний день большое распространение получили комбинированные конструкции из разнородных материалов так как они сочетать свойства нескольких материалов в одной конструкции. Одна из таких – комбинированная конструкция сталь-титан, сочетающая высокую коррозионную стойкость и низкую плотность титана с высокой прочностью и технологичностью стали.

Основной проблемой получения рассматриваемой конструкции является образование хрупких интерметаллидов, приводящих к разрушению места соединения. Для предотвращения образования прослоек используют методы сварки в твердом состоянии [1,2], а также промежуточные прослойки при сварке плавлением [3]. В качестве промежуточного слоя со стороны титана используют такие материалы как ниобий, ванадий и тантал, а со стороны стали используют медь или никель [3,4].

В данной работе использовался ниобий и медь. Выбор этих материалов обусловлен отсутствием областей существования фаз промежуточного состава во всем диапазоне концентраций. Выбор ниобия обусловлен следующими факторами: меньшей температурой плавления по сравнению с танталом, что не приводит к нарушению формирования наплавленного слоя, и меньшем диапазоном концентраций, в котором при взаимодействии с титаном образуются метастабильные α' , α'' и ω фазы.

Для проведения исследований образцы изготавливались на электронно-лучевой установке с энергоблоком ЭЛА-40И с ускоряющим напряжением 60 кВ. Впоследствии, был проведено металлографического исследования посредством оптической и электронной микроскопии и определены некоторые механические свойства. Для изготовления образцов использовались следующие материалы: титан Вt1-0, ниобий Нб-1, медь М0Б, сталь Св08Г2С. Общий вид одного из образцов приведен на рис. 1.

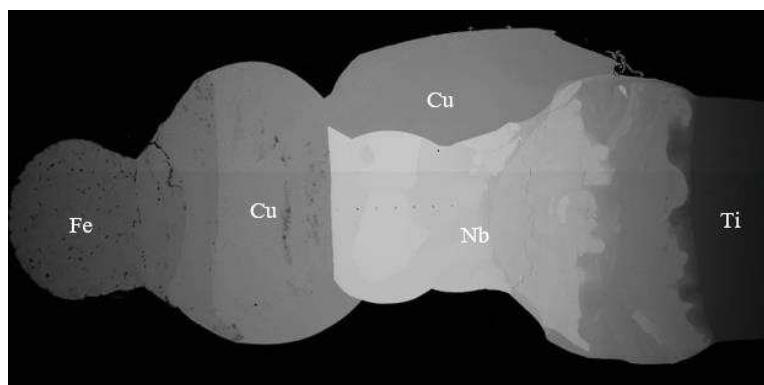


Рис. 1 - Панорамный снимок образца

При наплавке ниобия на титан отмечается неизбежное оплавления титана, вследствие большой разницы в температурах плавления. Во всех образцах отмечено ступенчатое снижение содержания титана от валика к валику, что проявляется различной травимостью слоев, и ступенчатым характером распределения твердости. Пик твердости в 220 HV наблюдается около линии сплавления, где образовалась игольчатая структура. Также по мере уменьшения содержания титана изменяется структура наплавленного металла. Если первый валик представлен ячеисто-дендритной структурой с выраженной ликвацией титана по периферии кристаллов, то в последующих валиках структура представлена крупными равноосными полигональными зернами, причем в верхних слоях структура особо крупнозернистая с размером зерна более 1 мм.

При наплавлении меди на ниобий ввиду большой разницы в температурах оплавление ниобия минимально либо отсутствует вовсе. Структура наплавленной меди характерно крупнозернистая. Твердость наплавленного слоя не имеет выраженных экстремумов и находится на уровне 50 HV. При изучении образцов установлено, что в образце с малым количеством ниобиевых валиков, и как следствие с более высоким содержанием титана в верхних слоях, активизируется межзеренное проникновение меди в ниобий. В свою очередь у образца с большим количеством валиков ниобия, и содержанием титана на уровне примеси проникновения меди не происходит. На одном из образцов капля жидкой меди стекла на боковую поверхность, вследствие чего в нижних слоях ниобия сформировалось межкристаллитное проникновение меди. Причем, за время нахождения меди в жидком состоянии, проникновения успела произойти на всю ширину образца.

После исследования дополнительной серии образцов было установлено, что наибольшее проникновение меди происходит при содержании титана в 13-20% (рис. 3а). Также было установлено, что перегрев ниобия, также активизирует межзеренное проникновение

меди, однако при незначительном содержании титана в ниобии, проникновение ограничено размерами одного зерна (рис. 3б).

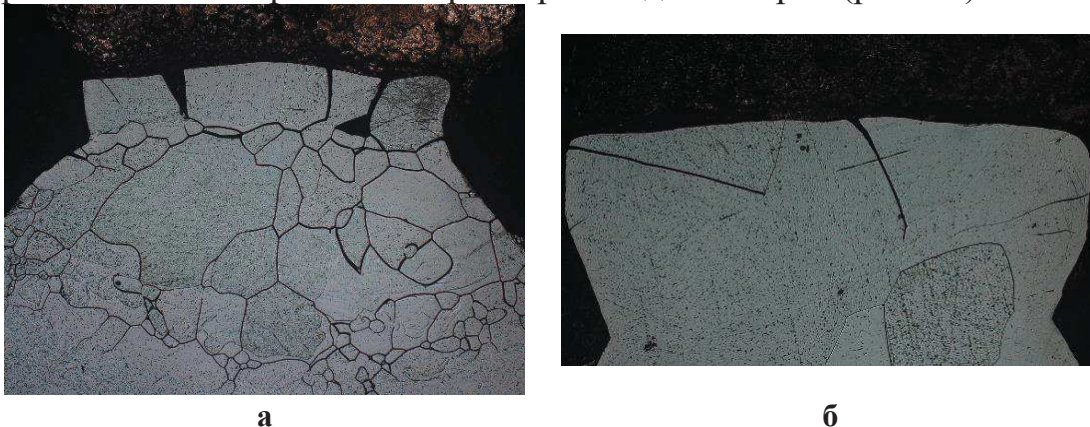


Рис. 3 - Межзеренное проникновение меди при: а) содержании титана в ниобии 13-20%, б) перегреве ниобиевого слоя

Исследование химического состава выявило диффузию титана из ниобия к меди в области затекания. Так при содержании титана в ниобии порядка 17%, в области проникновения содержания титана достигает до 26%. Исходя из концентрации, в области межзеренного проникновения наиболее вероятно образование эвтектики интерметаллидов $Ti_2Cu_3 + \beta-TiCu_4$ и $\beta-TiCu_4$. Твердость в области затекания составляет не менее 240 HV.

При наплавлении низкоуглеродистой стали на меди основным затруднением являлось оплавление и интенсивное перемешивание меди со сталью. В отдельных случаях проникновения стали, вследствие оплавления меди, может достигать ниобиевого слоя.

Структура наплавленных валиков различна. Первый слой представлен механической смесью железа с медью (рис. 4а). Во втором слое формируются закалочные структуры и включения твердого раствора на основе меди, размерами 1-2 мкм (рис. 4б). В последующих слоях количество свободной меди уменьшается. Содержание меди в верхнем слое составляет менее 0,29%, в то время как в первом слое 41,5%. Микроструктура верхнего слоя представлена закалочными структурами (рис. 4в). Максимальная твердость в 400 HV отмечена во втором слое, в котором наблюдалось дисперсное упрочнение стали медью. Также некоторое повышение твердости наблюдается в верхнем слое наплавленной стали, где выявляются закалочные структуры.

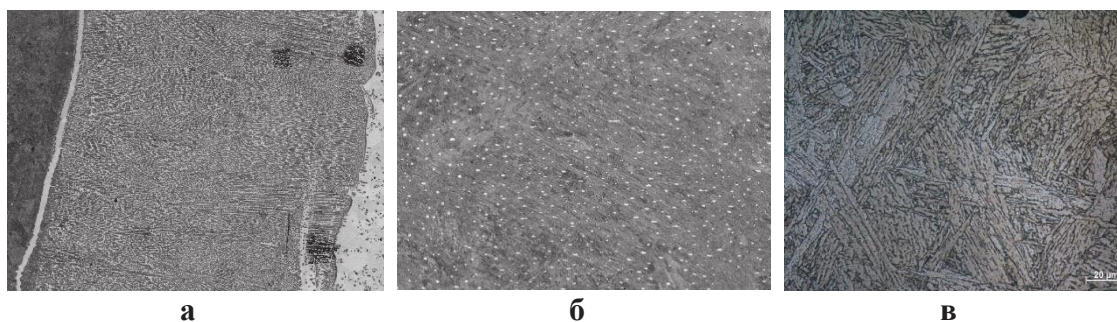


Рис. 4 - Микроструктура наплавленной стали а) первый слой, б) средний слой, в) верхний слой

Испытания на растяжение проводили на четырех образцах (рис. 5). В образцах №1 и №2 оплавление было меньшим, по сравнению с образцами №3 и №4. Временное сопротивление 3 из 4 образцов составляет 211-228 МПа, что соответствует уровню чистой меди. Образец №3 с пределом временного сопротивления в 150 МПа, по-видимому, имел дефекты в формировании соединения. Образец №4 разрушился нетипично: половина разрушения произошла по медному слою, а оставшаяся половина по ниобиевому.

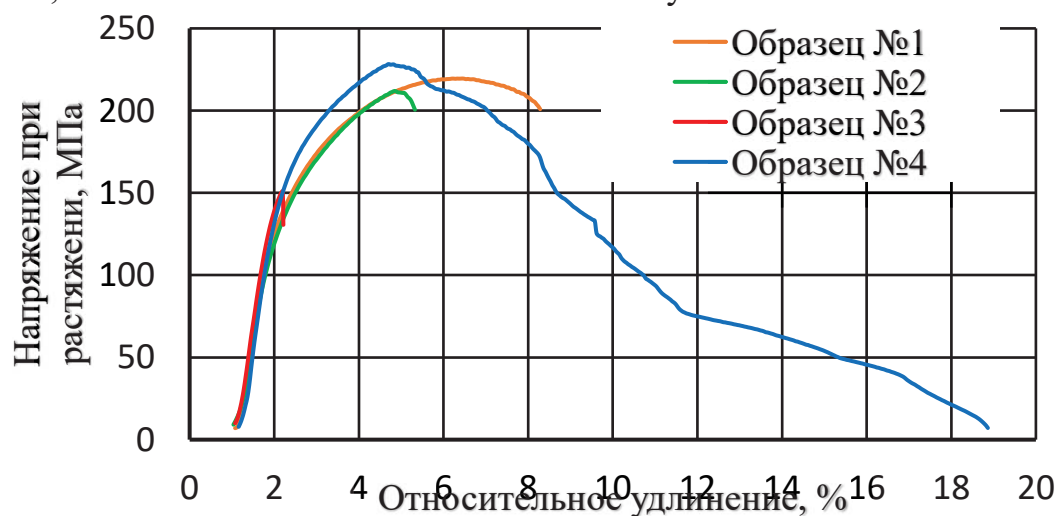


Рис. 5 - Диаграмма растяжения

Стоит отметить, что разрушения остальных образцов произошли по зоне сплавления меди с ниобия, структура которой представлено зернами меди с включением дендритов ниобия. По-видимому, вследствие различных коэффициентов линейного расширения, сформировались значительные внутренние напряжения, что обусловило разрушение по данной области.

Выводы

- Наплавка ниобиевой проволоки на титан сопряжена с технологическими трудностями, связанными с большой разницей температур плавления.

- При наплавке медной проволоки на ниобий возможно добиться таких режимов, при которых ниобий не оплавляется, что снижает вероятность возникновения межзеренного проникновения.

- Высокая концентрация титана (13-22%) в ниобиевом слое активизирует межзеренное проникновение меди с возможным образованием легкоплавких интерметаллидных фаз типа Ti_2Cu_3 и $\beta-TiCu_4$ по границам зерен.

- Наплавка стальной проволоки на медь требует тщательного подбора режима, ввиду склонности к перегреву медного слоя и нарушению стабильности формирования валика.

- Испытания растяжением показало, что временное сопротивление конструкции может достигать временного сопротивления меди или ниобия.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10338).

Список использованных источников

1. Hui Zhao. The Microstructure and Property of a Titanium-Carbon Steel Clad Plate Prepared Using Explosive Welding. MDPI: metals: Corrosion and Protection of Metallic Materials, 2022. № 5. 10 с.

2. M Ghosh, S Chatterjee, B Mishra, The effect of intermetallics on the strength properties of diffusion bonds formed between Ti-5.5Al-2.4V and 304 stainless steel, Materials Science and Engineering: A, Volume 363, Issues 1-2, 2003, Pages 268-274.

3. 12. Nd:YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer, Yusi Zhang and Diankui Sun and Xuehui Gu and Zhenzhen Duan and Hongzhi Li, Materials Letters, 2018, 212, 54-57

4. Mannucci, A., Tomashchuk, I., Mathieu, A., Bolot, R., Cicala, E., Lafaye, S., & Roudeix, C. (2020). Use of pure vanadium and niobium/copper inserts for laser welding of titanium to stainless steel. Journal of Advanced Joining Processes, 1, 100022.