



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-72-78>  
УДК 534.2

Поступила 19.07.2023  
Received 19.07.2023

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ СВАРНЫЕ ШВЫ, АРМИРОВАННЫЕ ПО ОБЪЕМУ ЛАНТАНОИДАМИ

Ю. С. УШЕРЕНКО, С. М. УШЕРЕНКО, А. Л. МИНЬКОВ, А. Х. ЯЗДАНИ-ЧЕРАТИ,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.  
E-mail: usherenko@gmail.com

*В условиях динамического воздействия высокоскоростных сгустков порошковых микрочастиц на объем зоны сварки между пластинами из стали 110Г13 и стали Ст. 10 формируются продольные упрочняющие каналные элементы, а также синтезируются редкоземельные элементы – лантан и церий.*

**Ключевые слова.** Сверхглубокое проникание, зона электросварки, синтез редкоземельных элементов.

**Для цитирования.** Ушеренко, Ю. С. Композиционные сварные швы, армированные по объему лантаноидами / Ю. С. Ушеренко, С. М. Ушеренко, А. Л. Миньков, А. Х. Яздани-Черати // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 72-78.  
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-72-78>.

## COMPOSITE WELDS REINFORCED IN VOLUME WITH LANTHANIDES

Yu. S. USHERENKO, S. M. USHERENKO, A. L. MINKOV, A. H. YAZDANI-CHERATI,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.  
E-mail: usherenko@gmail.com

*Under the conditions of dynamic impact of high-speed clusters of powdered micro-particles on the volume zone of welding between 110G13 and St.10 steel plates, longitudinal strengthening channel elements are formed, and rare earth elements such as lanthanum and cerium are also synthesized.*

**Keywords.** Super deep penetration, welding zone, synthesis of rare earth elements.

**For citation.** Usherenko Yu. S., Usherenko S. M., Minkov A. L., Yazdani-Cherati A. H. Composite welds reinforced in volume with lanthanides. *Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 3, pp. 72-78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-72-78>.

При воздействии режима сверхглубокого проникания – бомбардировке сгустками микрочастиц в формируемых армирующих каналных элементах (диаметры менее чем десятки микрон, а глубины более чем сотни миллиметров) синтезируются новые химические элементы. В данном случае целесообразно рассматривать в волокнах синтез редкоземельных элементов (лантаноидов – лантана и церия), так как они образуются в значимых количествах.

Для проведения исследований соединяли электросваркой пластины с размерами в десятки миллиметров: сталь 110Г13Л и сталь Ст. 10. Пластины по торцам сваривали электродами из стали Ст. 10 диаметром 2 мм. После сварки швы между сталями обрабатывали сгустками микрочастиц меди и карбида кремния в режиме сверхглубокого проникания (СГП).

В настоящее время в мировой науке заметно возрастает интерес к редкоземельным элементам (РЗЭ), в том числе к лантаноидам как к активным компонентам новых материалов. Результаты доказывают необходимость изучения этих металлов и процессов синтеза. В таких условиях появилось множество экспериментальных работ, посвященных изучению разных аспектов синтеза лантаноидов в зонах сверхглубокого проникания [1]. В комплексе химических элементов, используемых человечеством в различных сферах деятельности, особое место занимает отдельная группа – лантаноиды или лантаниды. Исходное название означает «подобные лантану», что лучше отражает суть свойств этих элементов, которые близки к свойствам лантана, а также обозначают направление – «идущие за лантаном» [2].

Данное семейство химических элементов включает в себя 14 элементов: церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb) и лютеций (Lu). Совместно с лантаном (La), скандием

(Sc) и иттрием (Y) такие элементы составляют группу так называемых редкоземельных элементов (РЗЭ, Rare Earth Elements – REE) [2]. Данные о содержании лантаноидов в природных источниках в Беларуси отсутствуют. В России такие элементы изучали на территориях с высокими концентрациями лантаноидов – техногенные и природные аномалии [2]. В настоящее время с распространением метода атомно-эмиссионной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой можно с достаточно высокой точностью определять концентрации РЗЭ [3]. Необходимость в обнаружении и накоплении положительных результатов поисковых работ редкоземельных элементов в настоящее время остается актуальной.

Требования, предъявляемые к современным материалам, металлам и сплавам, носят противоречивый характер. Удовлетворить эти требования можно путем использования композиционных материалов. Композиционным материалом (КМ) называют объемную гетерогенную систему, состоящую из различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых (в пределе – химически не взаимодействующих) компонентов, строение которых дает возможности использовать преимущества (свойства) каждого из них. В отличие от многих гетерогенных сплавов подавляющее число композиционных материалов находятся в неравновесном состоянии.

При соударении ударников с преградой признан эффект того, что глубина пробоя не превышает 6 калибров – размеров ударника. Однако разгон сгустков из множества микрочастиц при сверхглубоком проникании приводит к аномалии – относительная глубина проникания достигает сотни и тысячи размеров (калибров) исходного микроударника. Особый эффект сверхглубокого проникания – сгусток микроударников при соударениях с металлической преградой позволяет реализовать резкое уменьшение сопротивления ударам пылевых частиц (размер микрочастицы меньше чем 100 мкм). В режиме сверхглубокого проникания макросгустка, состоящего из микрочастиц (размеры микроударников до 100 мкм), реализуются глубины проникания в металлах на десятки и сотни миллиметров. Режим сверхглубокого проникания, т.е. разгон сгустков микрочастиц на аномальные глубины, сопровождается множеством микровзрывов. Генерация импульсов энергии обеспечивает движение вдоль траектории микрочастиц за счет множества микровзрывов, в том числе и при термоядерном синтезе лантаноидов [4].

При СГП сгустки дискретных микрочастиц соударяются с массивными металлическими преградами и проникают на глубины в десятки и сотни миллиметров, практически не останавливаясь. Трение микрочастиц с внутренней стенкой канальных элементов в объеме металлической преграды приводит к появлению внутри матрицы множества движущихся зарядов. Движение заряженных частиц в объеме твердого тела инициирует электромагнитные поля, а также множество микровзрывов. Излишки генерируемой энергии пульсируют в закрытых зонах. Пульсация вещества внутри матричного материала происходит в форме так называемых «солитонов» высокого давления [3]. Пульсации канальных элементов совмещаются в пространстве с канальными структурами (траекторией движения частиц), что приводит к взрывной локальной пульсации плотной плазмы. Ударно-волновые процессы генерируют в металлической оболочке ионы и обобществленные электроны.

### Результаты исследования

Выполнена ручная дуговая сварка (РДС) из образцов стали 110Г13 и стали Ст. 10 (рис. 1). Комплекс из сваренного материала обрабатывали в процессе динамической прошивки. Сгустки микрочастиц Si и SiC (исходные размеры частиц менее чем 100 мкм) использовали для динамической прошивки в диапазоне скоростей 600–1000 м/с. Средняя скорость разгона пылевого сгустка достигала 800 м/с.

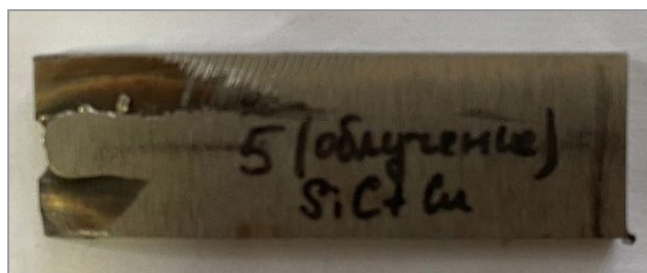


Рис. 1. Образец из двух исходных пластин стали 110Г13 и стали Ст. 10 с формированием горизонтальной зоны после РДС в центре и после прошивки образца сгустками микропорошков меди и частиц карбида кремния

Прошивку сгустками микрочастиц (пятикратная прошивка) проводили по вертикали, вдоль оси в сваренном образце (рис. 2, а, б).

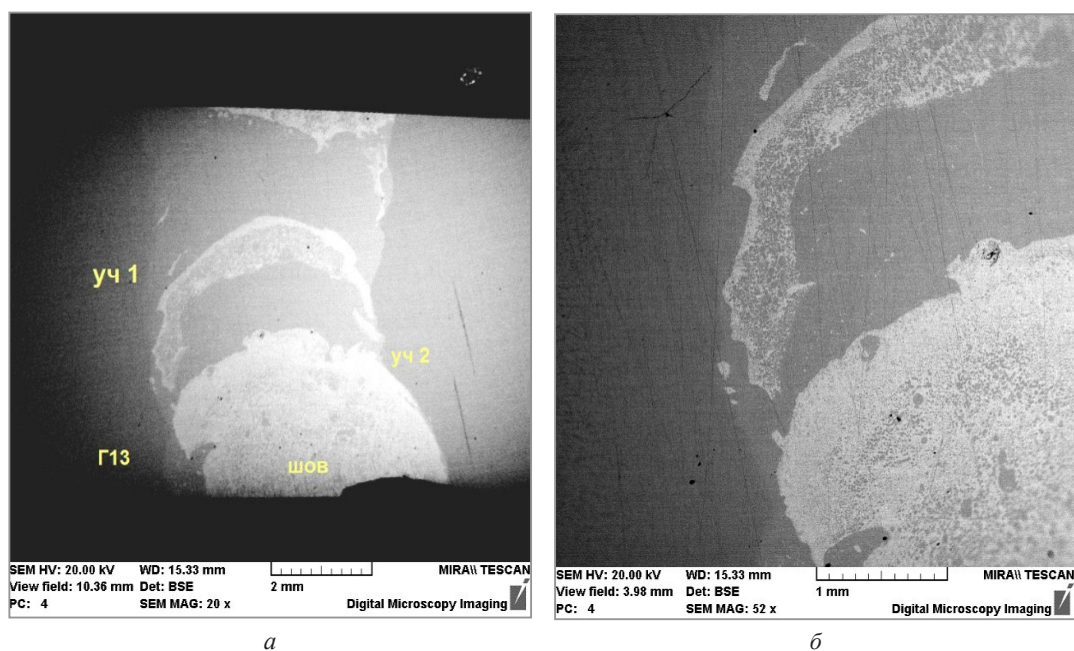


Рис. 2. Шов, зона соединения в основной материал из сваренного образца (зона сварки стали 110Г13 и стали Ст. 10 в центральной зоне): *а* – продольный вид; *б* – вертикальный вид

Зоны разнородной сварки с развитой поверхностью до прошивки сталей сгустками микрочастиц меди и карбида кремния в режиме сверхглубокого проникания показаны на рис. 3.

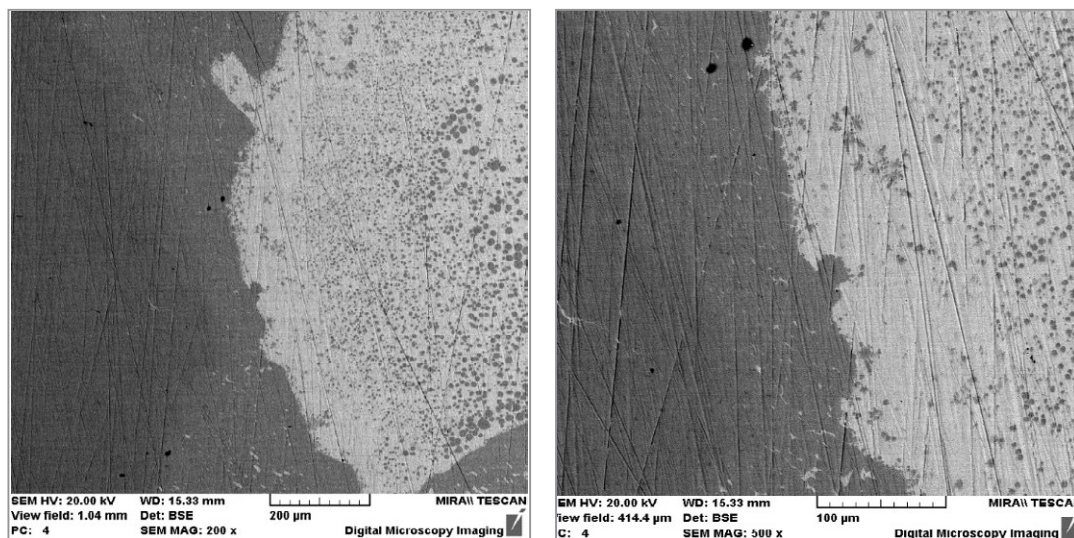


Рис. 3. Участки зоны сплавления (см. рис. 2, *б*)

Результаты эффектов сверхглубокого проникания пылевых сгустков порошковых микрочастиц в локальные объемы композиционных сталей 110Г13 и стали Ст. 10 приведены в таблице. Синтез лантаноидов реализуется в течение 20–30 дней (рис. 4).

Цветная фотография (рис. 5, *б*) отражает характер перемешивания после сверхглубокого проникания меди и карбида кремния. На рис. 5, *б* показаны цветные картины сварной зоны пластин из стали 110Г13 и стали Ст. 10 после последующей прошивки этой зоны сварки сгустками микрочастиц меди

#### Зоны локальной концентрации

Спектр	Si,%	Mn,%	Fe,%	Cu,%	C,%
1	0,7	4,6	83,9	10,8	Остальное
2	0,2	5,8	7,4	85,6	То же
3	0,4	4,9	35,6	58,4	То же
4	0,5	3,5	83,1	12,5	То же

Спектр	Si,%	Mn,%	Fe,%	Cu,%	C,%
5	0,2	5,0	26,3	67,7	Остальное
6	0,1	1,6	11,8	85,8	То же
7	0,5	1,6	45,6	51,5	То же
8	0,4	0,9	98,0	0,2	То же

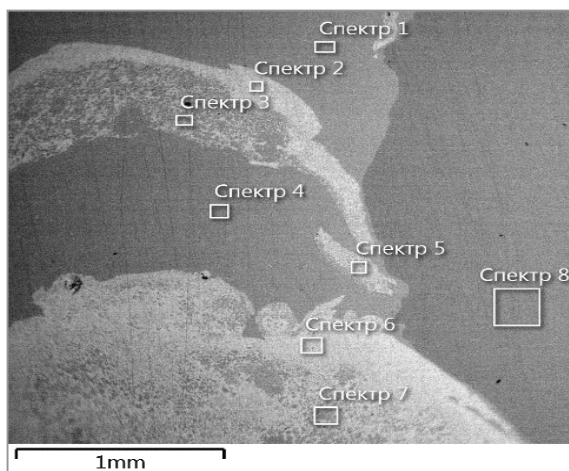


Рис. 4. Локальные спектральные анализы зон в области сварки и исходном состоянии, а также анализ зон, обработанных в режиме сверхглубокого проникания ступками микрочастиц меди и карбида кремния (зоны химического состава)

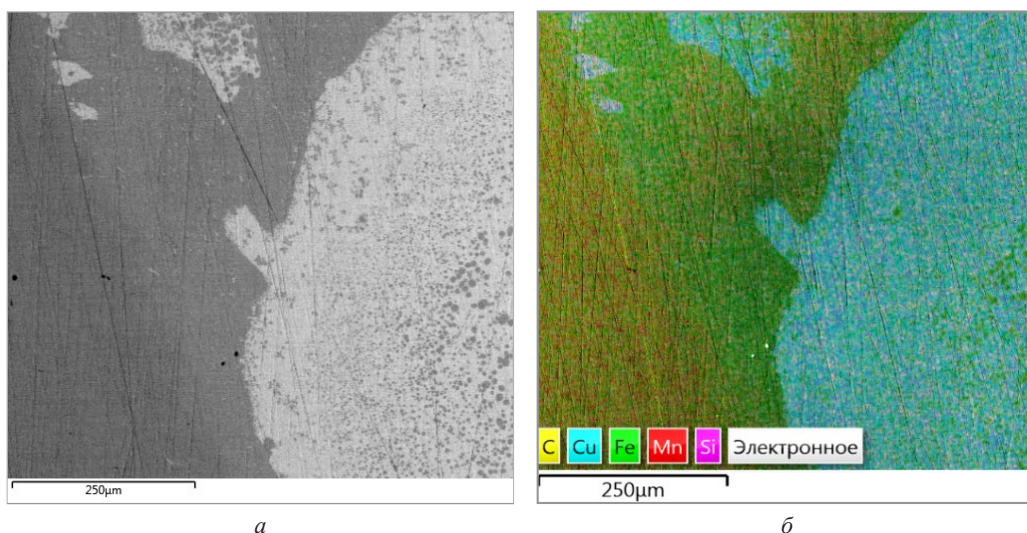


Рис 5. Участок 1. Черно-белая (а) и цветная (б) фотографии гаммы зон сварного материала (сварка в центральной зоне – сварка и прошивка сталей с разными химическими элементами)

и карбида кремния (размеры частиц менее чем 100 мкм). Различные химические элементы в зоне прошивки и сварки показывают цветную картину после сварки и прошивки ступками порошковых частиц в режиме сверхглубокого проникания со скоростями более чем 800 м/с. При этом режиме достигаются глубины прошивки в десятки и сотни миллиметров.

Особенности структурообразования разнородных макро- и микроэлементов показаны на рис. 7.

Синтез лантаноидов произошел при проникании в объем сталей ступок из порошка меди и карбида кремния. В настоящее время трудно предсказывать время синтеза для получения не радиоактивных элементов (лантаноидов).

Ступки микрочастиц порошка обеспечивают прошивку сталей на глубины в десятки миллиметров и формируют волокна, армирующие элементы дефектов прошивки по объему композиционного стального материала (рис. 8).

Анализ структуры (рис. 9) показывает концентрацию исходных материалов. Минимальная концентрация в зоне сварки сталей составляет от 100 частей кремния до 1500 частей меди. Максимальная концентрация синтезируемых химических элементов (лантаноидов) La – 200 частей и Ce – 150 частей показана после прошивки в режиме сверхглубокого проникания, а также после выдержки изделий после динамической обработки образцов в течение 1 мес. Максимальная концентрация исходного материала (Fe) – 5000 частей. Таким образом, концентрация лантана в обработанной зоне сварки достигла 4 мас. %, а церий – 3 мас. %. Концентрация химических элементов (рис. 10) и выдержка интервала времени (до 10 сут) обеспечивает синтез новых веществ (лантаноидов 3–4 мас. %).

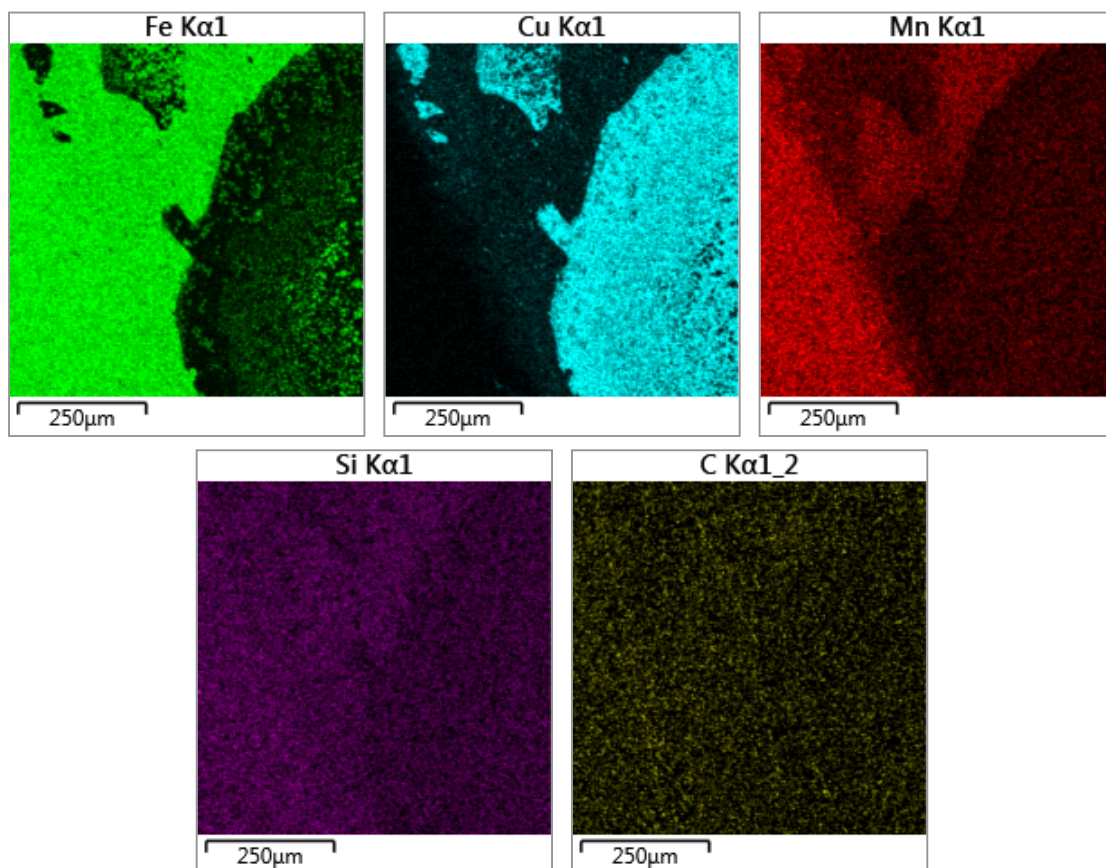


Рис. 6. Заготовка из сваренных образцов стали 110Г13 и стали Ст. 10 после прошивки сгустками частиц меди и карбида кремния (размеры микрочастиц менее чем 100 мкм)

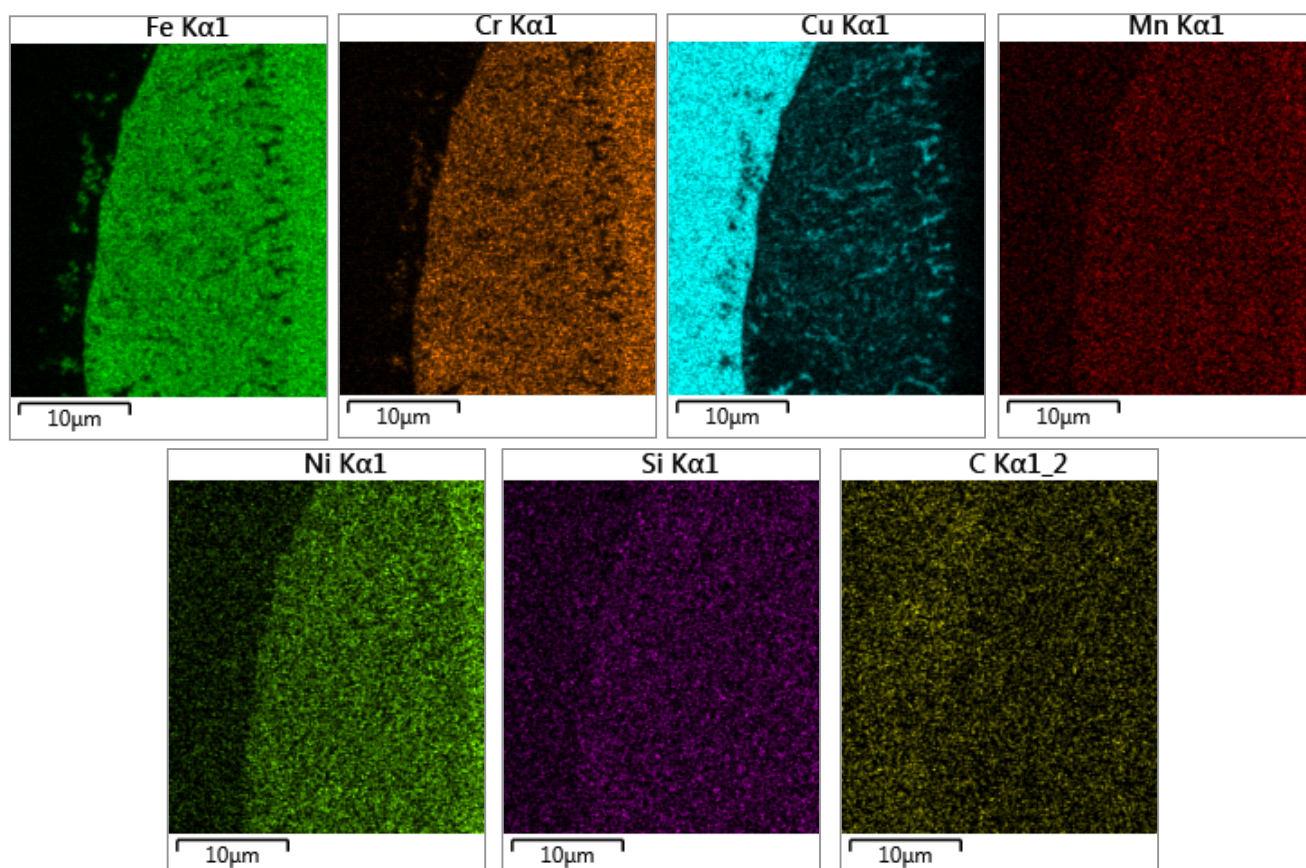


Рис. 7. Сварная зона пластин из стали 110Г13 и стали Ст. 10 после этапа прошивки этой зоны сварки сгустками микрочастиц меди и карбида кремния

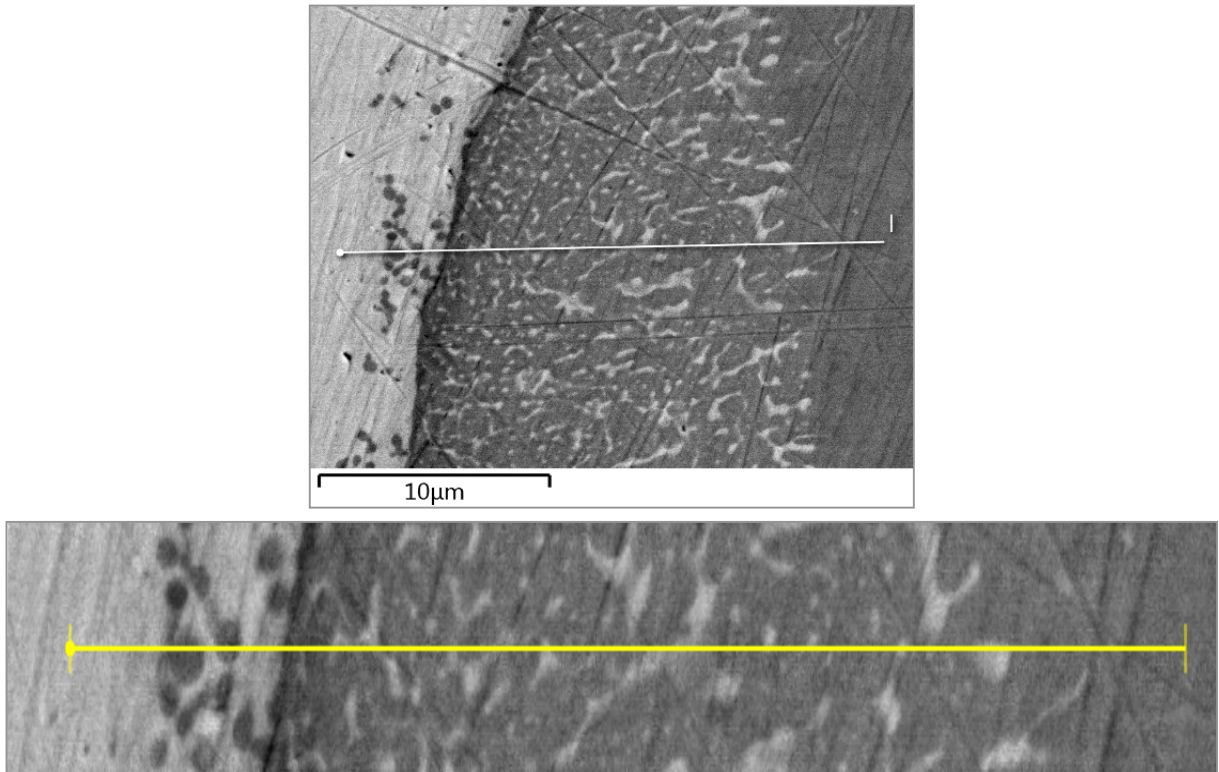


Рис. 8. Элементы структуры после прошивки зоны сварки (СГП) и дефектов прошивки в режиме сгустка порошковых микрочастиц

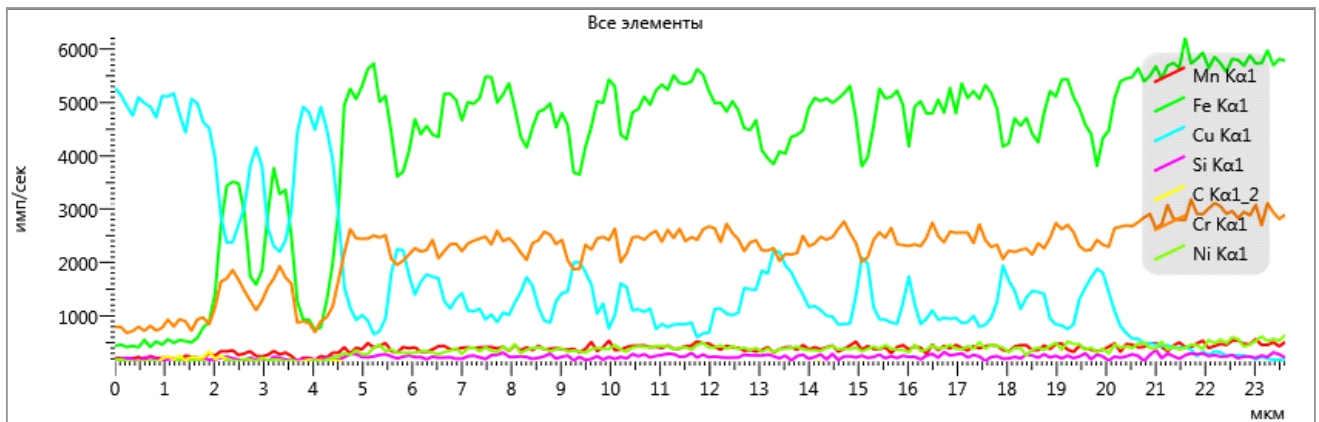


Рис. 9. Анализ концентраций Mn, Fe, Cu, Si, C, Cr и Ni как исходных элементов структуры после выполнения прошивки зоны сварки и создания дефектов прошивки



Рис. 10. Анализ концентраций Si, C, La, Ce как элементов структуры после динамической прошивки зоны сварки и создания дефектов прошивки в режиме сгустка порошковых микрочастиц

### Выводы

1. В результате выполненной работы исследованы особенности структурообразования волоконных структур, полученных после РДС в продольном направлении пластин из стали 110Г13 и стали Ст. 10.
2. Сваренные в продольном направлении стальные образцы обрабатывали сгустками порошковых микрочастиц меди и карбида кремния (размеры порошка менее 100 мкм). Данные частицы, которые являются микроударниками, проникают на всю глубину в продольном направлении вдоль зоны сварки и тем самым реализуется эффект сверхглубокого проникания: сгусток микроударников при соударениях с металлической преградой проникает на всю длину образца.
3. Были обнаружены значительные объемные изменения структуры стальных образцов после сварки и высокоэнергетического воздействия сгустками порошковых микрочастиц в режиме сверхглубокого проникания.
4. Несмотря на высокую дефектность структуры вдоль зоны сварки, удалось прошить насквозь зону сварки образцов смесью микрочастиц порошков (Cu и SiC) на глубины в сотню миллиметров.
5. В зоне сварки стальных пластин после обработки в режиме СГП зафиксирован синтез лантана и церия.
6. В зоне сварки (зона стали 110Г13 и стали Ст. 10) концентрация лантаноидов достигает 4 мас.%, а церия – 3 мас.%, что доказывает протекание термоядерного синтеза этих элементов в условиях практического приложения эффекта СГП.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Марукович, Е.И.** Процесс прошивки металлов и сплавов сгустками порошковых частиц. Перспективные материалы и технологии / Е.И. Марукович, Ю.С. Ушеренко, С.М. Ушеренко. Витебск: УО «ВГТУ», 2015. С. 314–331.
2. **Котельникова, А.Д.** Деградация, восстановление и охрана почв. Лантаноиды в почве: поступление, содержание, влияние на растения, генотоксичность (обзор) / А.Д. Котельникова, О.Б. Рогова, В.В. Столбова // Почвоведение. 2021. № 1. С. 100–119.
3. **Usherenko, S.** Dynamic Alloying of Steels in the Super-Deep Penetration Mode / S. Usherenko, Yu. Usherenko, V. Mironovs et al. // Materials. 2022, № 15(6). P. 2280.
4. **Ушеренко, Ю.С.** Модификация материалов сварной зоны в режиме сверхглубокого проникания / Ю.С. Ушеренко, С.М. Ушеренко, А.Л. Тарасевич, А.Н. Панько // Литье и металлургия. 2022. № 2. С. 111–117.

### REFERENCES

1. **Marukovich E.I., Usherenko Ju.S., Usherenko S.M.** Process proshivki metallov i spлавov sgustkami poroshkovykh chastic. Perspektivnye materialy i tehnologii [The process of piercing metals and alloys with bunches of powder particles. Promising materials and technologies]. Vitebsk, UO "VGTU" Publ., 2015, pp. 314–331.
2. **Kotel'nikova A.D., Rogova O.B., Stolbova V.V.** Degradacija, vosstanovlenie i ohrana pochv. Lantanoidy v pochve: postuplenie, sodержanie, vlijanie na rastenija, genotoksichnost' [Degradation, restoration and protection of soils. Lanthanides in soil: intake, content, effect on plants, genotoxicity]. *Pochvovedenie = Soil science*, 2021, no. 1, pp. 100–119.
3. **Usherenko S.M., Usherenko Yu.S., Mironovs V.** Dynamic Alloying of Steels in the Super-Deep Penetration Mode. *Materials*, 2022, no. 15(6). P. 2280.
4. **Usherenko Ju.S., Usherenko S.M., Tarasevich A.L., Pan'ko A.N.** Modifikacija materialov svarnoj zony v rezhime sverhglubokogo pronikanija [Modification of materials of the welded zone in the ultra-deep penetration mode]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 2, pp. 111–117.