

Исследование влияния параметров фокусирования ультракоротких импульсов в процессах лазерной сварки прозрачных материалов с металлами

М.А.Мурзаков, Н.Н.Евтихийев, Н.В.Грезев, Д.М.Катаев, Д.А.Антипов, Д.В.Биндюг

Исследовано влияние оптических параметров фокусирования лазерного излучения с импульсами пикосекундной длительности (1–3 пс) на процесс формирования сварного соединения прозрачных материалов с металлами. Определено, что при использовании объективов с числовой апертурой $NA = 0.25$ не происходит стабильного формирования сварных соединений, в отличие от использования линзы F-Theta с фокусным расстоянием 100 мм ($NA = 0.05$). Проведены испытания сварных швов на срез, средние значения прочности сварных соединений находятся в диапазоне 5–15 МПа. Проведены тесты на термоциклирование сваренных образцов в температурном диапазоне от -10°C до 60°C . Исследование сварных швов с помощью сканирующего электронного микроскопа выявило, что область взаимодействия стекло–металл составляет 250 нм. Впервые выполнена сварка таврового соединения элемента зеркала из кварца к подложке инвара, что значительно увеличивает применение данной технологии в промышленности, особенно для задач приборостроения и оптики.

Ключевые слова: пикосекундный волоконный лазер, ультракороткий импульс (УКИ), сварка стекла и металлов, фокусирование УКИ.

1. Введение

Лазерная микросварка с использованием лазеров ультракоротких импульсов (УКИ) применяется для соединения различных видов материалов: стекло–стекло [1–3], стекло–металл [4–6]. Использование УКИ-лазеров позволяет выполнять сварку с высокой точностью, производительностью и минимальной зоной термического воздействия. При этом способе соединения детали привариваются напрямую друг к другу без использования клеевых или иных промежуточных материалов. Это является значительным преимуществом, т.к. большинство клеевых материалов со временем начинают деградировать и при определенных условиях переходить в газообразное состояние, что приводит к ухудшению оптических свойств изделия.

Лазерная микросварка УКИ-лазерами соединений стекло–металл исследуется в мировой науке и представ-

ляет особый интерес в плане изучения физики процесса, поскольку происходит соединение двух материалов с различными коэффициентами термического расширения [6]. Сам процесс сварки разнородных материалов может осуществляться по двум физическим принципам: в режиме теплопроводного нагрева металла с использованием наносекундных импульсных лазеров [7–9] и в режиме аккумуляции тепла с использованием УКИ-лазеров с высокой частотой следования импульсов (более 1 кГц). В последнем случае возникают как линейные процессы нагрева металла, так и нелинейные эффекты в стекле. Однако в работе [10] отмечается, что при использовании наносекундных лазеров прочность сварных соединений ниже, чем при экспериментах с УКИ-лазерами. Следует отметить, что во всех работах [4–10] исследования проводились с хорошо отполированными поверхностями, которые обеспечивают оптический контакт или отсутствие свободной поверхности при сварке. Это существенно ограничивает применение данных технологий в промышленности, поскольку получение оптического контакта на реальном производстве значительно усложняет подготовительные операции перед сваркой. Анализ литературных данных показал, что исследования влияния параметров фокусирования лазерного излучения УКИ-лазеров в процессах сварки соединений стекло–металл не проводились. Таким образом, способ соединения стекло–металл при использовании УКИ-лазеров требует дополнительного изучения. Настоящая работа является продолжением предыдущих исследований авторов по сварке УКИ-лазерами соединений стекло–стекло [11–12].

В настоящей работе проводится сравнительный анализ двух оптических схем с использованием короткофокусных объективов с большой числовой апертурой $NA = 0.25$ с фокусным расстоянием 5 мм и линзы F-Theta с фокусным расстоянием 100 мм ($NA = 0.05$). Рассмотрены

М.А.Мурзаков, Н.В.Грезев, Д.М.Катаев. ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 3, стр. 5;

e-mail: clericfull@gmail.com

Н.Н.Евтихийев. ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 3, стр. 5; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Д.А.Антипов. ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 3, стр. 5; Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Д.В.Биндюг. ООО НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 3, стр. 5; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049 Москва, Ленинский просп., 4

Поступила в редакцию 13 февраля 2024 г.

три различных сценария сборки заготовок как с зазором, так и без него при использовании длиннофокусной и короткофокусных систем в процессе лазерной микросварки с применением УКИ-лазера. Проведен ряд исследований прочности сварных соединений стекло–металл: испытания на срез, термоциклирование образцов, анализ места соединения стекло–металл с помощью сканирующего электронного микроскопа.

2. Методика исследования

2.1. Оборудование и материалы

Для сварки использовался пикосекундный волоконный лазер YLPP-100-3-50-R (производство «ИРЭ-Полус») с пиковой мощностью 30 МВт. Общие характеристики лазера представлены ниже.

Длина волны (нм)	1030
Длительность импульса (пс)	1–3
M^2	1.22
Частота следования импульсов (кГц)	100, 200, 500
Максимальная энергия в импульсе (мкДж)	100

Размер пятна $2W_0$ и длина Рэлея Z_0 рассчитываются по следующим формулам:

$$2W_0 = \frac{M^2 \lambda}{\pi NA}, \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{M^2 \lambda n}{\pi NA^2}, \quad (2)$$

где M^2 – безразмерная характеристика качества пучка лазера; λ – длина волны; NA – числовая апертура объектива; $n = 1.46$ – показатель преломления для боросиликатного стекла. Расчетные значения пятна и длины Рэлея для двух объективов представлены в табл.1.

Табл.1. Расчетные значения размера пятна и длины Рэлея для различных объективов.

Объективы	Параметры	
	$2W_0$ (мкм)	Z_0 (мкм)
Линза F-Theta с $NA = 0.05$	16	285
Микрообъектив с $NA = 0.25$	4	11

Для сварки использовалось боросиликатное стекло Vогоfloat 33 и кварц Corning 7980 (оба толщиной 2 мм). Данные типы стекол широко используются в различных областях промышленности – медицине, оптике, приборостроении.

Для сварки со стеклом были выбраны три марки металлов: нержавеющая сталь (12X18Н10Т), алюминий (АД 35), инвар (36Н). Нержавеющая сталь и алюминий взяты как наиболее распространенные в промышленности материалы для решения различного рода задач в приборостроении. Инвар был выбран из-за схожих физических свойств с кварцем, а именно значений коэффициента температурного расширения: инвар – $1.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, кварц – $0.54 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ в интервалах температур от -20°C

до 100°C для обоих материалов. Образцы стекла и металла были разрезаны методом лазерной резки на пластины размером $60 \times 20 \times 2$ мм.

2.2. Исследование сварных соединений стекло–металл

Для определения прочности сварных соединений были проведены испытания на срез с использованием разрывной машины марки INSTRON 5969. Для обеспечения равномерного распределения нагрузки в месте сварки дополнительно на концах образцов в местах захватов приваривались пластины. Методика испытаний подробно описана в работе [12].

Были подготовлены образцы с различным количеством сварных швов. Расчет напряжений после испытаний проводился по формуле

$$\sigma = \frac{F}{Sn_w}, \quad (3)$$

где F – сила нагрузки; S – площадь сварного шва в зоне сварки заготовок; n_w – количество сварных швов.

После лазерной микросварки УКИ-лазером образцы были разрезаны поперек сварного шва, для получения так называемых макрошлифов. Затем они подверглись шлифовке и полировке для получения зеркальной поверхности. Подготовленные таким образом макрошлифы исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM). Для проведения элементного SEM-анализа твердых веществ используется энергодисперсионный рентгеновский детектор (EDS-детектор). Аналитический метод, который лежит в основе принципа работы детектора, базируется на анализе возбуждаемого электронным пучком рентгеновского излучения, характерного для каждого химического элемента [13]. Исследуя энергетический спектр такого излучения, можно сделать вывод как о качественном, так и о количественном составе образца. Глубина выхода рассеянного рентгеновского излучения, регистрируемого EDS-детектором, составляет от 1 до 3 мкм. Минимальное регистрируемое содержание химических элементов составляет 0.1 вес.%, поэтому в случае исследования образцов с покрытием содержание и присутствие некоторых элементов будет зависеть от энергии электронов. Двумерное сканирование электронного пучка по поверхности образца при регистрации рентгеновского излучения – элементное картирование – позволяет получить карты распределения химических элементов высокого разрешения в области анализа и выполнить визуализацию концентраций элементов. Исследование поверхности на сканирующем электронном микроскопе было выполнено с помощью детектора вторичных электронов (SE-детектор) при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Проведение испытаний образцов инвар + кварц на термоциклирование выполнялось по заданному температурному интервалу от -10°C до $+60^\circ\text{C}$. Выдержка образцов осуществлялась по следующему алгоритму: 2 ч выход на температуру $+20^\circ\text{C}$ и ее стабилизация, 4 ч выход на -10°C , 4 ч при -10°C , 4 ч выход на $+60^\circ\text{C}$, 2 ч при температуре $+60^\circ\text{C}$, далее все повторяется четыре раза. Общее время проведения испытаний составило 2 суток. После испытаний на термоциклирование образцы подвергались механическому воздействию с целью определения прочности соединения.

3. Результаты экспериментов

3.1. Механизмы образования сварных швов стекло–металл

При лазерной сварке соединения стекло–металл возможны три сценария процесса: сварка без зазоров, сварка с зазорами при использовании короткофокусных объективов, сварка с зазорами с использованием длиннофокусных объективов. Рассмотрим каждый случай подробнее. На рис.1 показана схема образования сварных соединений стекло–металл при воздействии лазерного излучения различной интенсивности.

В случае плотного прилегания двух заготовок (металлической и стеклянной) происходит бездефектное формирование сварного соединения, что продемонстрировано на рис.1,а. При этом возможно использование как короткофокусных, так и длиннофокусных объективов. Данный случай описывается во всех литературных источниках [4–10], однако имеет основной недостаток – необходимость тщательной подготовки образцов перед сваркой и обеспечения оптического контакта.

На рис.1,б представлен сценарий без плотного прилегания заготовок к друг другу. При использовании объектива с $NA = 0.25$ с фокусным расстоянием 5 мм интенсивность лазерного излучения составляет порядка 10^{14} Вт/см², и при появлении зазора или свободной поверхности процесс сварки сопровождается абляционными процессами. Фокусирование лазерного излучения осуществлялось на металле, тем самым преобладающим механизмом были абляционные процессы металла, а ввиду короткой (11 мкм) длины Рэлея нелинейные процессы в стекле не начинали происходить.

В третьем случае, на рис.1,в, представлен сценарий без плотного прилегания заготовок к друг другу с использованием линзы F-Theta с фокусным расстоянием 100 мм ($NA = 0.05$) и зазором в процессе сварки. В данном случае

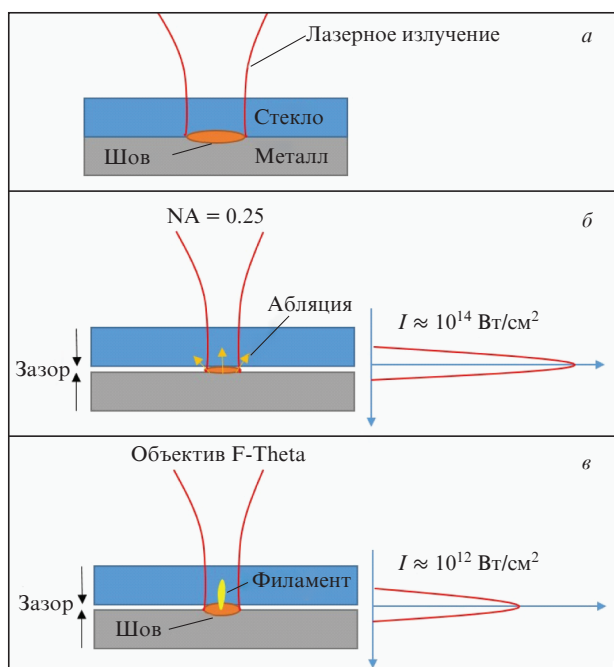


Рис.1. Схема образования сварных соединений стекло–металл.

возникают два явления: линейный нагрев металла и нелинейные процессы в стекле, которые приводят к формированию сварного шва в виде филамента. Ранее в работе [11] было выявлено, что процесс формирования модифицированной структуры в стекле происходит при интенсивностях лазерного излучения порядка 10^{12} Вт/см². Также за счет увеличенной длины Рэлея линзы F-Theta ($NA = 0.05$) по сравнению с объективами с $NA = 0.25$ возможно поддержание двух типов процессов – линейного в металле и нелинейных в стекле, что приводит к образованию сварных соединений на границе раздела стекло–металл при сборке с зазором.

3.2. Проведение экспериментов по сварке стекло–металл

В ходе исследования проводились эксперименты в трех диапазонах скоростей обработки: до 25, 120 и 500 мм/с. Стоит отметить, что образцы предварительно не обрабатывались и не шлифовались. При экспериментах с объективами с числовой апертурой $NA = 0.25$ все сваренные образцы разрушались от малейших нагрузок, объяснение данного факта дано выше. Далее представлены результаты с применением линзы F-Theta.

На рис.2 показан внешний вид сварных соединений нержавеющая сталь–стекло (вид сверху через привариваемое стекло). По результатам экспериментов стоит отметить, что формирование сварных швов происходит при энергиях в импульсе от 30–40 мкДж, скорости обработки составили 20–25 мм/с. Ширина сварного шва находится в диапазоне 170–200 мкм.

Из результатов сварки соединения алюминий–стекло можно сделать аналогичные выводы. Дальнейшие эксперименты направлены на повышение производительности процесса, увеличение скорости составило 120 мм/с для соединения нержавеющая сталь–стекло, 500 мм/с для соединения алюминий–стекло. При увеличении скоростей сварки ширина сварного шва изменилась и составила 70 мкм для обоих видов соединений. Эксперименты по сварке УКИ-лазером соединений металл–стекло продолжились на повышенных скоростях. Выполнена сварка образцов для испытаний на разрыв.

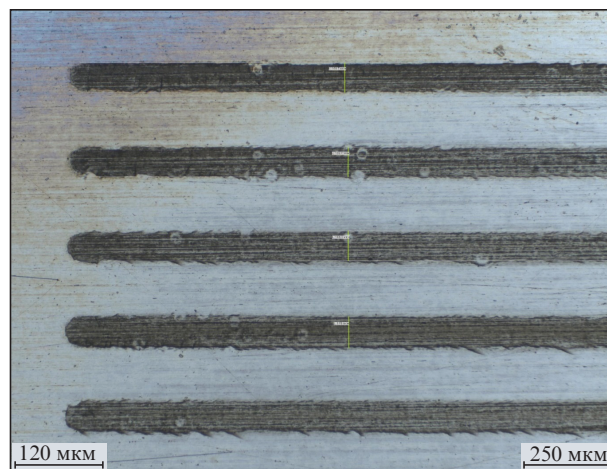


Рис.2. Внешний вид сварных швов сверху, соединение нержавеющая сталь–стекло.

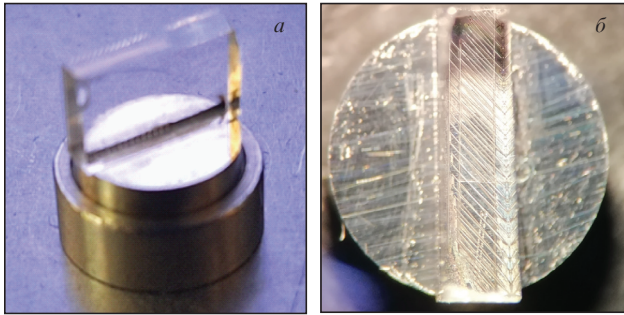


Рис.3. Результат сварки таврового соединения инвар–кварц: общий вид образца (а) и вид сверху (б).

Проведены эксперименты по сварке инвар–кварц для выполнения таврового соединения для задач приборостроения. В данном случае сварка осуществлялась с использованием прижимной оснастки и на скорости 60 мм/с, энергия импульса составила 40 мкДж. Результат представлен на рис.3. Полученные образцы были подвергнуты испытаниям на термоциклирование по методике, представленной выше.

Рис.3,б наглядно демонстрирует, что инвар перед сваркой не шлифовался до зеркальной поверхности. Это показывает применимость данной технологии для промышленности.

3.3. Проведение испытаний образцов

Результаты испытаний сварных соединений на срез представлены на рис.4. Средние значения нагрузки составили 6 МПа для соединений нержавеющая сталь–стекло и 13 МПа для соединения алюминий–стекло. Данные результаты согласуются с приведенными в литературных источниках [6].

После испытаний образцов на срез, для соединения нержавеющая сталь–стекло выполнено исследование места разлома с помощью метода SEM. Проведен элементный анализ стеклянной и металлической пластин, сняты карты распределения элементов в области сварки. В табл.2 и 3 сведены результаты элементного анализа необработанных областей пластин.

Табл.2. Элементный состав металлической пластины.

Элемент	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
Вес. %	1.39	0.76	18.63	1.28	69.42	7.83	0.38	0.31

Табл.3. Элементный состав стеклянной пластины.

Элемент	O	Na	Al	Si	K
Вес. %	55.69	2.08	1.31	40.42	0.51

На рис.5 показаны изображения торца сваренных пластин. Щель между пластинами составляет около 10 мкм. Область обработки со стороны стекла выкрошена на глубину примерно 50 мкм, что обусловлено процессом шлифовки и подготовки образцов к исследованиям.

На рис.6 представлено характерное изображение металлической пластины после разрыва, приведены карты

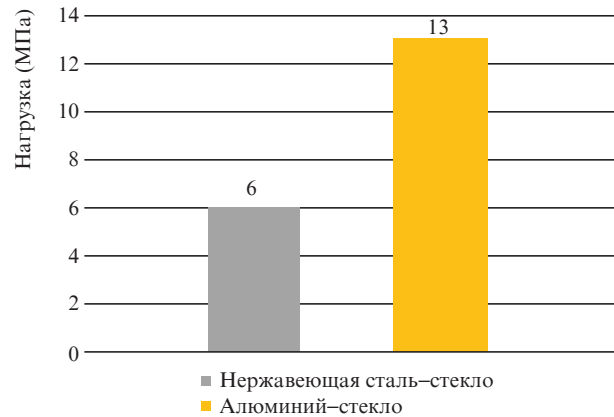


Рис.4. Результаты испытаний сварных соединений нержавеющая сталь–стекло, алюминий–стекло.

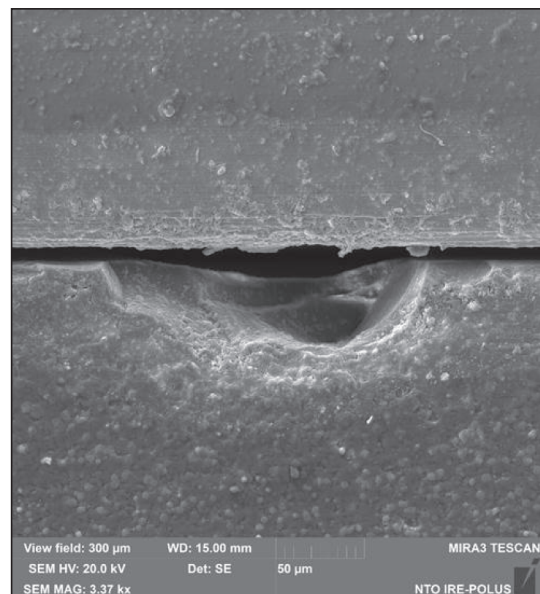
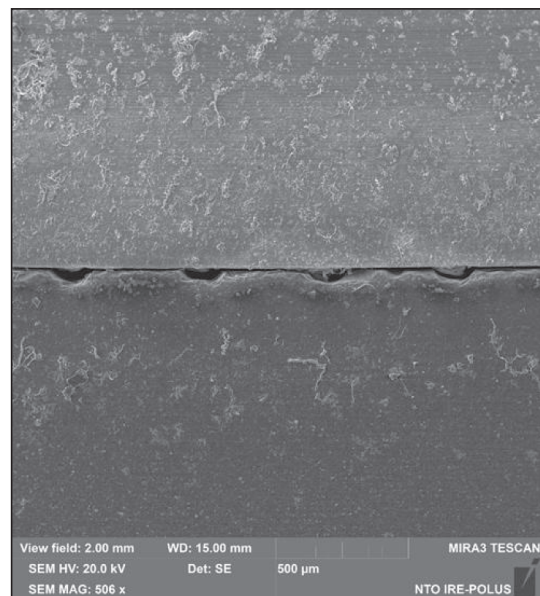


Рис.5. Область сварки металлической и стеклянной пластин при ширине поля обзора 2 мм (а) и 300 мкм (б).

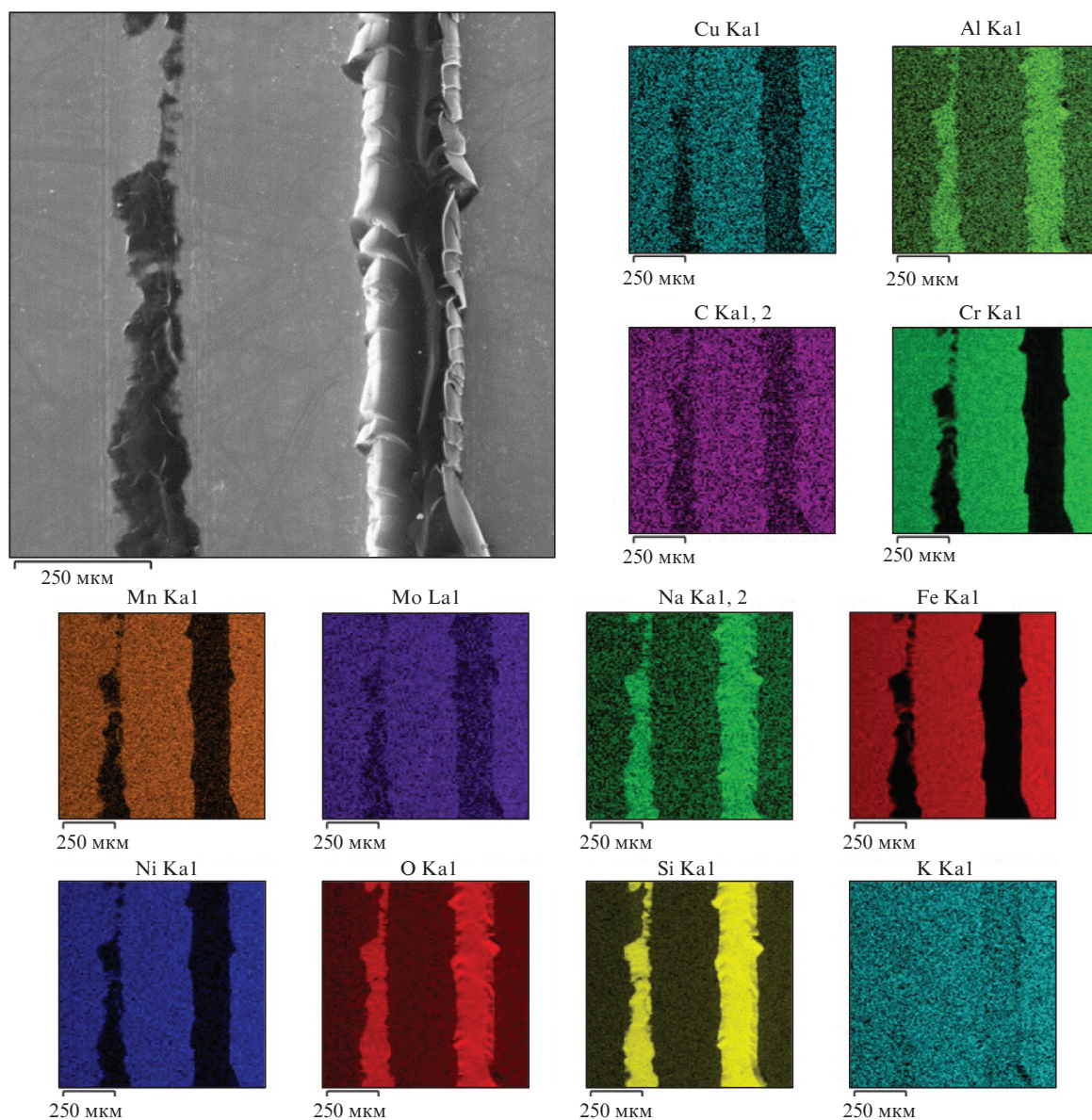


Рис.6. Область сварки на металлической пластине после разрыва при ширине поля обзора 1 мм.

распределения элементов. На поверхности присутствуют остатки стекла.

В областях, где стекло не было выкрошено, присутствуют остатки материала металлической пластины. Их можно видеть на рис.6 по увеличению концентрации Cr и Fe в данных областях. Была измерена толщина сохранившегося слоя, содержащего металлы, она составила примерно 250 нм.

Образцы соединения инвар–кварц (см. рис.3) были подвергнуты термоциклированию в диапазоне температур от -10°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Все образцы успешно прошли испытания, что говорит о высокой прочности сварных соединений таких материалов, как инвар–кварц.

4. Заключение

Проведено исследование влияния параметров фокусировки ультракоротких импульсов на процесс формирования сварных соединений металл–стекло.

Рассмотрены три сценария фокусировки лазерного излучения в зависимости от возникновения зазоров. При

оптическом контакте двух поверхностей металла и стекла сварка выполняется с объективами с числовой апертурой $NA = 0.25$ и с линзой F-Theta ($NA = 0.05$).

В случае возникновения свободной поверхности в процессе лазерной сварки металла и стекла преобладающим механизмом является абляция металла без формирования сварного шва.

При использовании линзы F-Theta возникают два механизма формирования сварного соединения металл–стекло: линейные процессы в металле и нелинейное поглощение в стекле.

Впервые успешно выполнена сварка таврового соединения инвар–кварц с прочным формированием сварного шва без дополнительных операций шлифовки и полировки. Данные образцы успешно прошли испытания на термоциклирование в диапазоне температур от -10°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Проведены испытания сварных соединений на срез, для соединения нержавеющая сталь–стекло средние значения прочности составили 6 МПа, для соединения алюминий–стекло – 13 МПа.

SEM-анализ образцов после испытаний на срез показал, что в стекле присутствуют частицы металла и толщина слоя составляет 250 нм.

1. Cvecek K., Dehmel S., Miyamoto I., Schmidt M. *International J. Extreme Manufacturing*, **1**, 042001 (2019).
2. Miyamoto I., in: *Handbook of Laser Welding Technologies* (Woodhead Publishing Limited, 2013, p.301). DOI: 10.1533/9780857098771.2.301.
3. Richter S., Nolte S., Tünnermann A. *Phys. Procedia*, **39**, 556 (2012).
4. Lipat'eva T.O., Fedotov S.S., Lipat'ev A.S., Lotarev S.V., Shakhgil'dyan G.Yu., Ryabov K.V., Sigaev V.N. *Glass and Ceramics*, **11**, 435 (2021).
5. Carter R.M., Chen J., Shephard J.D., Thomson R.R., Hand D.P. *Appl. Opt.*, **53**, 4233 (2014).
6. Ciuca O.P., Carter R.M., Prangnell P.B., Hand D.P. *Materials Characterization*, **120**, 53 (2016).
7. Utsumi A., Ooie T., Yano T., Katsumura M. *J. Laser Micro/Nanoeng.*, **2**, 133 (2007).
8. Carter R.M., Troughton M., Chen J., Elder I., Thomson R.R., D. Esser M.J., Lamb R.A., Hand D.P. *Appl. Opt.*, **56**, 4873 (2017).
9. Matsuyoshi S., Mizuguchi Y., Muratsugu A., Yamada H., Tamaki T., Watanabe W. *J. Laser Micro/Nanoeng.*, **13**, 21 (2018).
10. Ozeki Y., Inoue T., Tamaki T., Yamaguchi H., Onda S., Watanabe W., Sano T., Nishiuchi S., Hirose A., Itoh K. *Appl. Phys. Express*, **1**, 082601 (2008).
11. Murzakov M.A., Evtikhiev N.N., Grezev N.V., Kataev D.M., Shevelkina E.D., Kuznetsova D.Yu., Patrina Zh.G. *Laser Phys. Lett.*, **20**, 085603 (2023).
12. Murzakov M.A., Evtikhiev N.N., Grezev N.V., Kataev D.M., Shchekin A.S. *Laser Phys. Lett.*, **21** (2024) (в печати).
13. Akhtar K., Khan S.A., Khan S.B., Asiri A.M., in: *Handbook of Materials Characterization* (Springer Cham, 2018).