

УДК 539.4.016.3:669-1; УДК 621.791

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИКОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕД ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКОЙ

*В. Ю. ЖЕЛЕЗНОВ*¹, *В. Е. РОГАЛИН*¹, *Т. В. МАЛИНСКИЙ*¹,
*С. И. МИКОЛУЦКИЙ*¹, *Ю. В. ХОМИЧ*¹, *А. В. ЛЮШИНСКИЙ*²,
*Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО*³

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики
Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Авиационно-космические технологии»
Москва, Россия

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 539.4.016.3:669-1; UDC 621.791

THE USE OF THE OPTOPLASTIC EFFECT FOR THE PRELIMINARY PREPARATION OF SURFACES BEFORE DIFFUSION WELDING

*V. YU. ZHELEZNOV, V. E. ROGALIN, T. V. MALINSKIY, S. I. MIKOLUTSKIY,
YU. V. KHOMICH, A. V. LIUSHINSKII, F. I. PANTELEYENKO*

Аннотация. Показано, что при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера с плотностью энергии $0,1 \dots 1,0$ Дж/см² на поверхности металлов выявлены следы проскальзывания и растрескивания по границам зерен. Внутри зерен происходило кристаллографическое скольжение. На поверхности металла возникал микровыступ высотой до 1 мкм и даже более. Полученный результат, названный оптикопластическим эффектом, рассматривается как удобный способ формирования субмикронных структур на поверхностях, подлежащих диффузионной сварке (ДС). Высказано предположение, что этот метод модификации поверхности должен эффективно стимулировать процесс ДС.

Ключевые слова: оптикопластический эффект, ультрафиолетовый (УФ) лазер, модификации поверхности, лазерная обработка, диффузионная сварка.

Abstract. It is shown that, under the impact of radiation from a nanosecond ultraviolet laser with an energy density of $0,1 \dots 1,0$ J/cm², traces of sliding and cracking along grain boundaries are revealed on the surface of metals. Crystallographic slipping occurred inside the grains. A microprotrusion with a height of up to 1 μ m, and even more, appeared on the metal surface. The result obtained, called the optoplastic effect, is considered as a convenient method for the formation of submicron structures on surfaces subject to diffusion welding (DW). It has been suggested that this method of surface modification should effectively stimulate the DW process.

Keywords: optoplastic effect, ultraviolet (UV) laser, surface modifications, laser processing, diffusion welding.

Диффузионная сварка в настоящее время активно применяется в высокотехнологичных областях промышленности, прежде всего таких, как атомная и авиакосмическая. Там требуется использование конструктивных элементов на пределе их технических возможностей. Нередко для этого требуется прочное и точное соединение в одной детали разнородных материалов, и часто данный процесс возможен исключительно с использованием ДС [1, 2], т. к. далеко не все материалы поддаются традиционным методам сварки.

Для увеличения предела прочности сварного шва при ДС, а также для снижения оптимальной температуры процесса, что, зачастую, бывает принципиально важно, вследствие нежелательности превышения температуры фазового перехода материала в процессе сварки применяют различные методы интенсификации процесса.

В последнее время для этого начинают применять предварительное микро- и наноструктурирование поверхностей свариваемых деталей при воздействии лазерными импульсами наносекундной длительности [3–5] с целью улучшения адгезионных свойств. Адгезия, как известно [6], определяется, прежде всего, диффузионными явлениями, а импульсное лазерное воздействие способствует резкому изменению параметров диффузии, вплоть до увеличения коэффициента диффузии на величину до 6–10 порядков [7, 8]. Эти процессы происходят в поверхностном слое, поэтому его модификация может оказать значительное влияние на ДС.

До сегодняшнего дня считалось, что процесс микро- и наноструктурирования поверхности при лазерном воздействии происходит при превышении порога оптического пробоя, сопровождаемого интенсивным плазмообразованием, плавлением и испарением металла с образованием кратера [3]. Однако недавно был обнаружен оптикопластический эффект [9, 10]. При воздействии излучения наносекундного УФ-лазера на поверхности меди и ее сплавов при предпороговых значениях плотности энергии были выявлены заметные изменения структуры металла без изменения фазового состояния. В настоящее время исследования этого нового явления продолжаются.

Сообщается о продолжении этих исследований в части углубленного анализа результатов измерений профилограмм поверхности металла в зоне воздействия лазерного излучения.

Исследовали образцы из бескислородной меди, полированные по стандартной оптической технологии [11]. Как и в [9, 10], где подробно изложена методика эксперимента, использовался импульсно-периодический Nd:YAG-лазер (третья гармоника, длина волны $\lambda = 355$ нм, энергия в импульсе $E = 8$ мДж при длительности $\tau = 10$ нс, частота повторения $f = 10$ Гц). Воздействие производили при комнатной температуре ~ 20 °С.

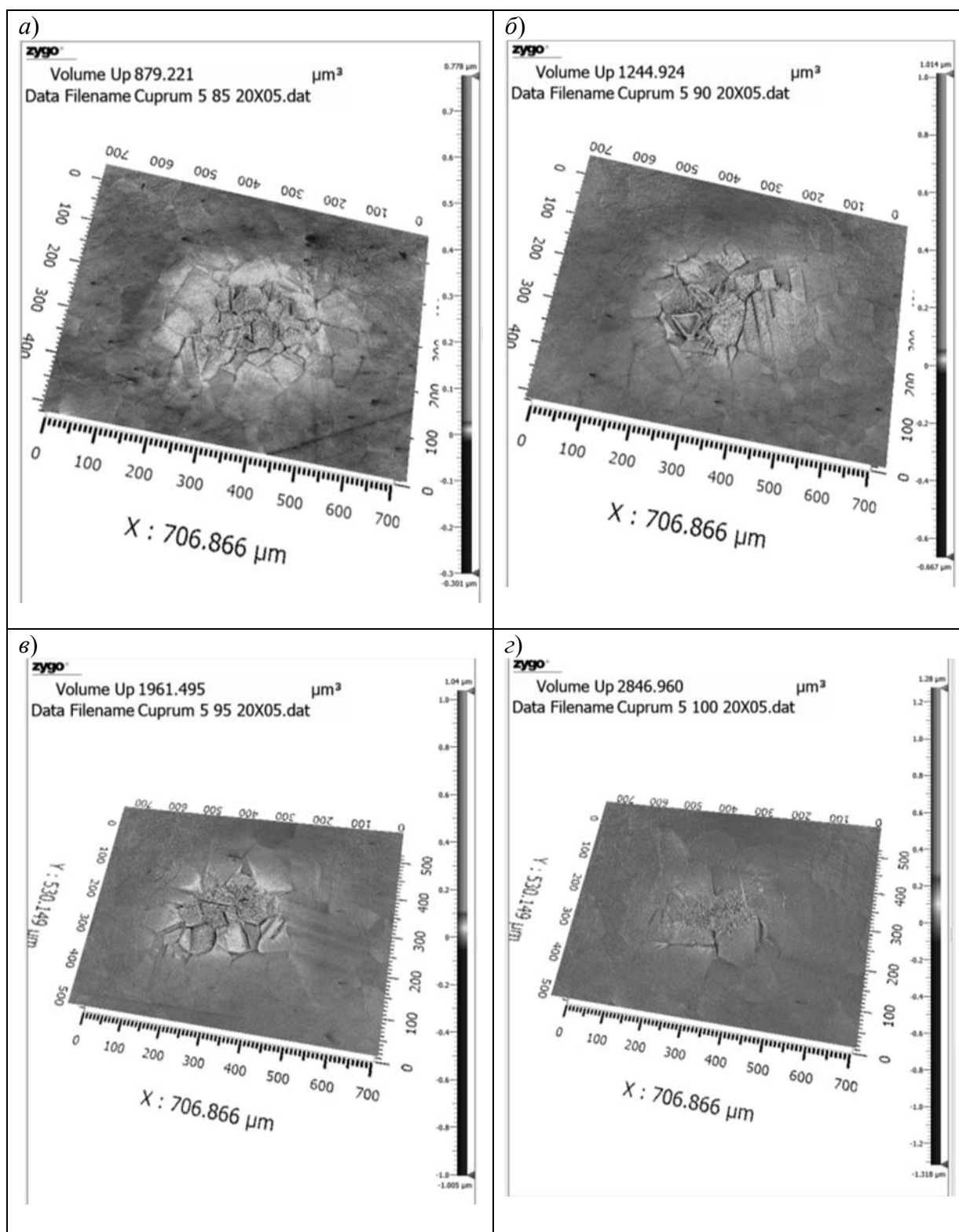


Рис. 1. Профилограммы поднятий на поверхности зеркал из бескислородной меди после воздействия пятью импульсами УФ-лазера при плотности энергии: *a* – 0,61 Дж/см² – $V = 880$ мкм³, $PV = 1,08$ мкм; *б* – 0,82 Дж/см² – $V = 1245$ мкм³, $PV = 1,682$ мкм; *в* – 1,02 Дж/см² – $V = 1960$ мкм³, $PV = 2,45$ мкм; *г* – 1,07 Дж/см² – $V = 2850$ мкм³, $PV = 2,6$ мкм

Ранее в [9, 10] сообщалось, что при таком режиме поверхность образца успевает, в течение импульса 10 нс, полностью нагреться до предплавильной температуры и полностью остыть за время ~ 20 нс. Таким образом, следующий импульс воздействует на полностью остывшую поверхность. Облученные образцы исследовались на профилометре Zygo New View 7300 и анализировались с использованием программ MetroPro 8.3.5 и Mx.

Состояние поверхности контролировалось и на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6610LV.

На каждом образце измерялись объем образовавшегося поднятия на поверхности и величина PV – перепада высот на поверхности в измеряемом кадре размером $0,71 \times 0,53$ мкм².

Обнаружена явная тенденция роста объема поднятий и значения PV как от количества воздействующих импульсов, так и от средней плотности энергии импульсов. Данные получены при изменении средней плотности энергии импульсов в диапазоне $0,2 \dots 1,07$ Дж/см². При $E \sim 1,0$ Дж/см² начинается плавление поверхностного слоя.

Диапазон плотностей энергии, при которых удалось наблюдать реально измеряемые объемы возникающих поднятий, довольно узкий – $E = 0,1 \dots 1,0$ Дж/см². При меньших значениях E на наноуровне также возникают аналогичные повреждения, но они не обнаруживаются на фоне реальной шероховатости поверхности образца. Возможно, что при существенно меньшей шероховатости их удастся обнаружить.

Верхняя граница наблюдаемого оптикопластического эффекта – $1,0$ Дж/см². Это величина порога оптического пробоя меди при использованных параметрах излучения. При превышении данного значения в приповерхностном слое металла в зоне воздействия происходит фазовый переход из конденсированного состояния, плавление и испарение металла. Это явление изучено в [12]. Образовавшийся кратер и бруствер вокруг него из выброшенного расплавленного металла значительно превышают размеры поднятия и полностью перекрывают оптикопластический эффект, хотя процессы в приповерхностном слое, приводящие к этому эффекту, видимо, продолжаются.

Поглощение света металлами изучено в [13]. Электронная подсистема перегревается при передаче энергии фотонов электронам скин-слоя ~ 15 нм. За время электрон-ионной релаксации ($2 \dots 3$ пс) происходит поглощение энергии фононами и резкий нагрев приповерхностного слоя. Процесс сопровождается резким ростом концентрации неравновесных точечных дефектов.

Известно радиационное распухание [14] – процесс, происходящий при непрерывном режиме воздействия ионизирующего излучения. Но при воздействии разнообразных импульсных полей наблюдается аномальный

массоперенос [7, 8]. Основную ответственность за такую аномалию несет перемещение межузельных атомов по механизму Шоттки. Предполагается [15], что плавление кристаллических металлов происходит в результате лавинообразной генерации межузельных дефектов.

Количество избыточных атомов на поверхности, появившихся в результате воздействия (объем поднятия), соответствует, по порядку величины, концентрации межузельных атомов в меди при предплавильных температурах [16, 17] $\sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$.

В данном случае для образования поднятия в приповерхностном слое меди оказалось достаточно этого количества межузельных атомов, возникших при высокотемпературных процессах.

При оптикопластическом эффекте поднятие на оптической поверхности при воздействии импульсов наносекундного УФ-лазера при плотности энергии $0,1 \dots 1,0 \text{ Дж/см}^2$ формируется при сохранении конденсированного состояния металла, за счет пластической деформации нагретого приповерхностного слоя. При быстром нагреве и охлаждении этого слоя наблюдалось движение структурных дефектов – межузельных атомов, дислокаций и границ зерен. Заметный вклад в массоперенос внесен благодаря генерации избыточного количества точечных дефектов при предплавильных температурах. Межузельные атомы диффундируют на поверхность по механизму Шоттки. В то же время менее подвижные вакансии, видимо, остаются преимущественно в узлах решетки и не успевают коагулировать за время процесса ($\sim 30 \text{ нс}$). Объем поднятия пропорционален вложенной энергии в поверхностный слой как за счет роста плотности энергии импульсов, так и за счет их количества. Это подтверждает тепловой механизм оптикопластического эффекта при наносекундном воздействии ультрафиолетовых лазерных импульсов.

Таким образом, созданный при оптикопластическом эффекте слой на поверхностях свариваемых материалов должен эффективно содействовать процессу ДС. Сохранение металла в конденсированном состоянии позволяет рассчитывать на уменьшение массы оксидов на поверхности, охрупчивающих зону сварки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красулин, Ю. Л.** О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии / Ю. Л. Красулин // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 1. – С. 89–97.
2. **Люшинский, А. В.** Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – Москва: Академия, 2006. – 208 с.

3. **Хомич, В. Ю.** Механизмы и модели прямого лазерного наноструктурирования материалов / В. Ю. Хомич, В. А. Шмаков // *Успехи физических наук.* – 2015. – Т. 185, № 5. – С. 489–499.
4. Способ сварки деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе с использованием лазерного излучения: пат. 2752822 С1 / Т. В. Малинский, С. И. Миколуцкий, В. Е. Рогалин, С. А. Филин, Ю. В. Хомич, В. А. Ямщиков. – Опубл. 06.08.2021.
5. **Хомич, В. Ю.** Исследование термической обработки поверхностей металлов и керамик наносекундными импульсами лазерного ультрафиолетового излучения для диффузионной сварки: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.1 (05.16.01) / В. Ю. Хомич. – Санкт-Петербург, 2021. – 139 л.
6. **Voyutskii, S. S.** The Diffusion Theory of Adhesion / S. S. Voyutskii // *Rubber Chemistry and Technology.* – 1960. – Vol. 33, № 3. – P. 748–756.
7. Влияние многократного лазерного воздействия на массоперенос в железе / М. Е. Гуревич [и др.] // *Металлофизика.* – 1978. – Т. 73. – С. 80–83.
8. Изменение структуры сплава медь–хром, облученного импульсом CO₂-лазера / Р. Е. Ровинский [и др.] // *Физ. и хим. обраб. матер.* – 1980. – № 3. – С. 7–11.
9. Пластическая деформация меди в результате воздействия мощного ультрафиолетового наносекундного лазерного импульса / Т. В. Малинский [и др.] // *Письма в ЖТФ.* – 2020. – Т. 46, вып. 16. – С. 51–54.
10. **Малинский, Т. В.** Пластическая деформация меди и ее сплавов при воздействии наносекундным ультрафиолетовым лазерным импульсом / Т. В. Малинский, В. Е. Рогалин, В. А. Ямщиков // *Физика металлов и металловедение.* – 2022. – Т. 123, № 2. – С. 192–199.
11. **Окатов, М. А.** Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2004. – 679 с.
12. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – Москва: Наука, 1970. – 272 с.
13. **Соколов, А. В.** Оптические свойства металлов / А. В. Соколов. – Москва: Физматлит, 1961. – 464 с.
14. **Зеленский, В. Ф.** Радиационные дефекты и набухание металлов / В. Ф. Зеленский, И. М. Неклюдов, Т. П. Черняева. – Киев: Наукова думка, 1988. – 296 с.
15. String-like cooperative motion in homogeneous melting / H. Zhang [et al.] // *Journal of Chemical Physics.* – 2013. – Vol. 138. – P. 125–538.
16. **Simmons, R. O.** Measurement of equilibrium concentrations of vacancies in copper / R. O. Simmons, R. W. Balluffi // *Physical Review.* – 1963. – Vol. 129. – P. 1533–15445.
17. **Mei, Q. S.** Melting and superheating of crystalline solids: From bulk to nanocrystals / Q. S. Mei, K. Lu // *Progress in Materials Science.* – 2007. – Vol. 52. – P. 1175–1262.