

УДК 620.174.25

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-6-301-81-86

*А. И. Горунов, О. А. Нюхляев***ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12X18H10T****Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева – КАИ**

e-mail: aigorunov@kai.ru, 9wikolega@gmail.com

В работе изучено влияние ультразвуковых колебаний на структуру и механические свойства образцов из стали 12X18H10T.

Ключевые слова: акустические колебания, трехточечный изгиб, микротвердость, аустенитная сталь

*A. I. Gorunov, O. A. Nyukhlyayev***INFLUENCE OF ACOUSTIC VIBRATIONS ON THE STRUCTURE
AND PROPERTIES OF 12Cr18Ni10Ti STEEL SAMPLES****Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI**

The paper studies the influence of ultrasonic vibrations on the structure and mechanical properties of 12X18H10T steel samples.

Keywords: acoustic vibrations, three-point bending, microhardness, austenitic steel

Требования к получению качественных сварных соединений для машиностроительных предприятий постоянно возрастают. Для создания глубокого проплавления металла с узкой зоной термического влияния требуются фокусированные источники лазерного излучения [1, 2].

Для обеспечения качественного сварного соединения требуется правильный выбор присадочных материалов, инструментов и оборудования, а также подходящая подготовка образцов. Для улучшения качества металла сварного шва может быть использованы дополнительные внешние воздействия такие как ультразвуковые колебания. Они влияют на конвекцию расплава и последующий процесс затвердевания за счет специфического воздействия кавитационных и акустических течений [3–5]. Применение ультразвуковых колебаний получило широкое распространение в литье. Применение ультразвука используется при дуговой и лазерной сварке. Однако большинство исследований проводится на фиксированной частоте в относительно узком диапазоне колебаний 20–40 кГц [6, 7]. Ранние исследования показывают, что влияние ультразвука на расплавы металлов может осуществляться в широком диапазоне [7, 8].

В настоящей работе проведено исследование влияния ультразвуковых колебаний на

структуру и свойства аустенитной нержавеющей стали марки 12X18H10T в процессе лазерной сварки. Для осуществления лазерно-акустической сварки использовались соноотроды с собственной частотой колебаний 15 (ниже ультразвука), 22, 40, 80, 100 кГц [9, 10].

На рис. 1 представлена микроструктура основного металла исходных образцов непосредственно перед сваркой. Микроструктура металла образца, предварительно полученного методом прокатки, состоит из α - и γ -фаз, а также наблюдаются двойники [11].

На рис. 2 представлены изображения микроструктуры металла в поперечном сечении сварных швов, полученных при различных акустических воздействиях. Форма швов во всех случаях одинакова с некоторыми изменениями геометрических размеров (рис. 4). Однако структура металла шва и его форма существенно изменяются при наложении акустических колебаний с частотой звука 15 кГц (рис. 2, б).

На рис. 2 показано распределение микротвердости в поперечном сечении шва на различной глубине образцов.

При этом можно видеть, что в центральной части шва образцов полученных лазерной сваркой, без дополнительной обработки ультразвуковыми колебаниями, происходит увеличение твердости (рис. 2, а).

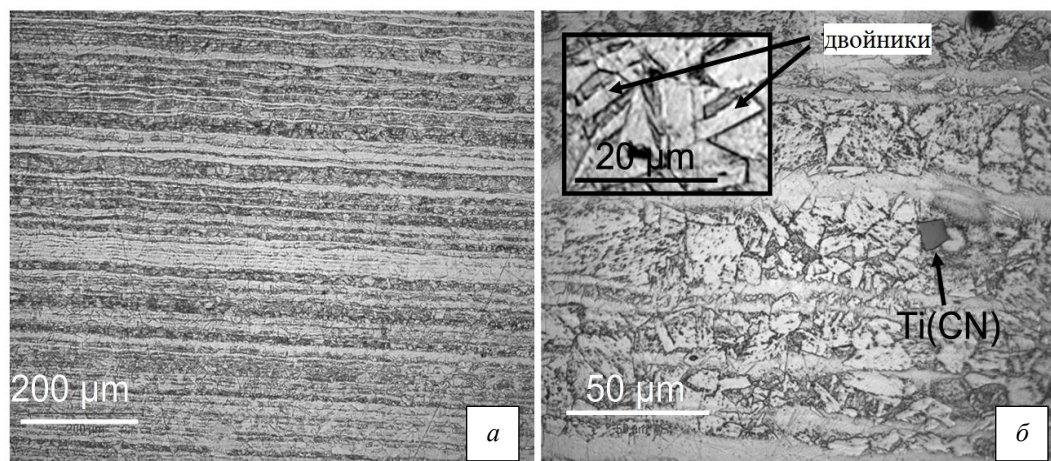


Рис. 1. Микроструктура основного металла из стали 12X18H10T при различном увеличении

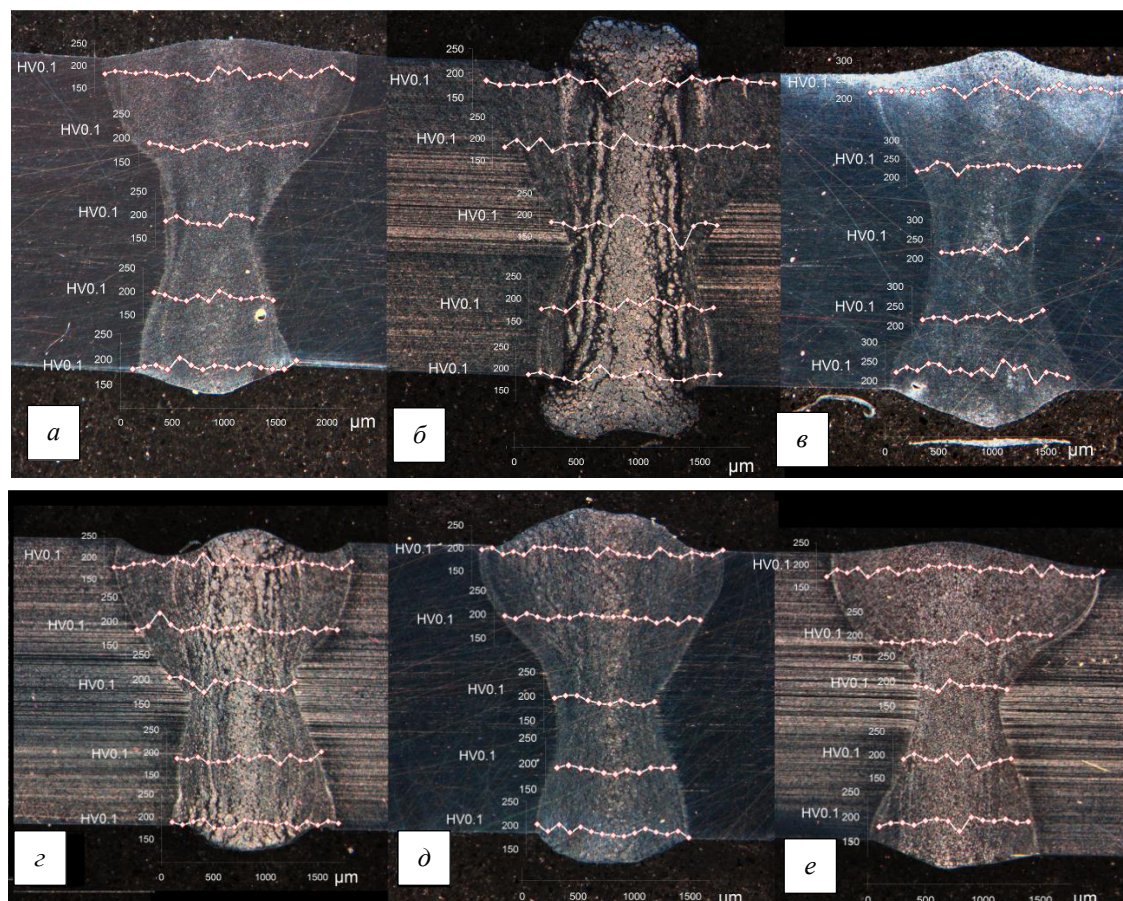


Рис. 2. Изображения сечений швов и распределения микротвердости при разной глубине шва: без акустического воздействия (а) и разных частотах наложенных акустических колебаний: 15 кГц (б); 22 кГц (в); 40 кГц (г); 80 кГц (д); 100 кГц (е)

Частота акустических колебаний 15 кГц при лазерной сварке приводит к увеличению разброса значений твердости в сварном шве по сравнению со сварным швом полученным лазерной сваркой без ультразвуковой обработки. Это можно объяснить локализацией ликвации

на границе зерен. При этом четко выражены вытянутые чередующиеся светлые и темные участки различного травления вдоль шва. Верхняя и нижняя части шва выступают за поверхность заготовки примерно на 1000 мкм, что в 3 раза больше, чем у шва, полученного без

наложенных акустических колебаний (рис. 3). Предположительно, это можно объяснить сонокапиллярным эффектом. Сонокапиллярный эффект представляет собой повышенное проникновение жидкости в капилляр, щель или трещину под действием приложенного акустического поля [12]. Явление наблюдается и в жидких металлах [12]. Можно предположить, что 15 кГц является «резонансной» частотой, благоприятной для проявления данного

эффекта в случае расплавления нержавеющей стали 12Х18Н10Т [13].

На рис. 3 можно видеть исследование основных структурных зон металла сварных швов. На рис. 3, *а* видно, что при лазерной сварке без ультразвуковых колебаний в структуре шва присутствуют темные и светлые участки повышенного травления. При этом можно наблюдать разнотернистость металла (области отмечены красными пунктирными линиями).

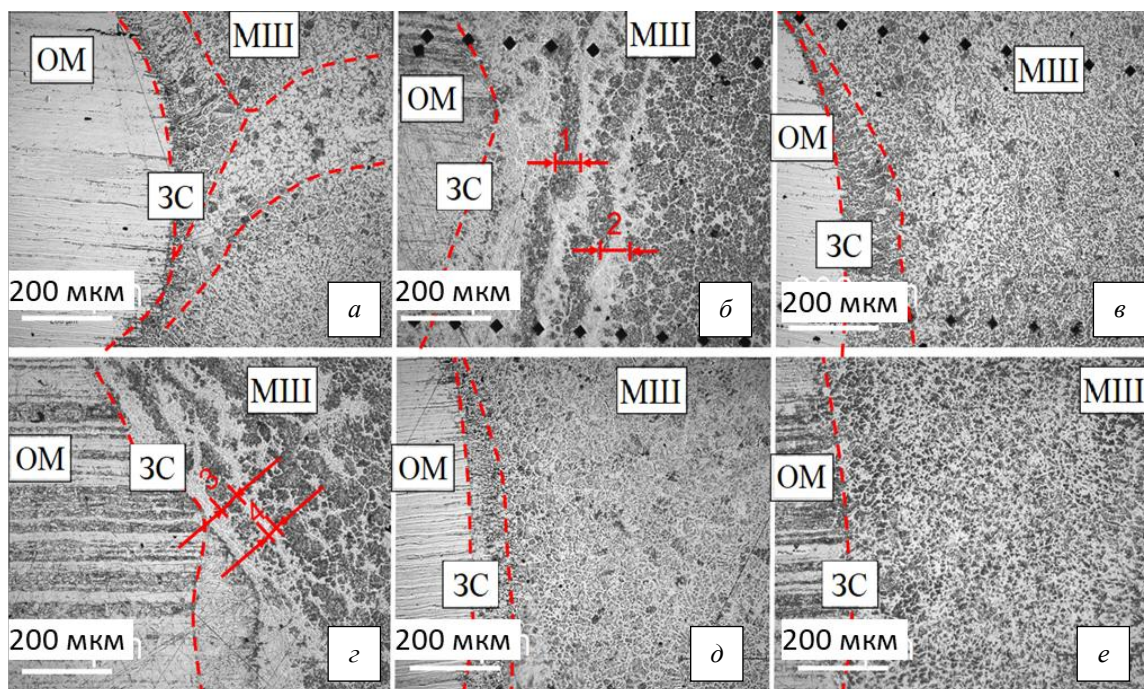


Рис. 3. Микроструктура зоны сплавления (ЗС) между основным металлом (ОМ) и металлом шва (МШ) без акустического воздействия (*а*) и на разных частотах акустических волн: 15 кГц (*б*); 22 кГц (*в*); 40 кГц (*г*); 80 кГц (*д*); 100 кГц (*е*)

На рис. 3, *б* показано воздействие ультразвуковых колебаний с частотой 15 кГц на микроструктуру сварного шва. В результате воздействия ультразвуковых колебаний образуются полосы различной травимости, характерные для темных (феррит + бейнит) и светлых (аустенит) фаз. Ширина темных полос составляет ~50 мкм, светлых ~100 мкм. В случае использования акустических колебаний с частотой 40 кГц, как показано на рис. 3, *г*, размеры этих полос заметно уменьшаются, достигая 20 мкм для светлых участков и 50 мкм для темных участков. На этом же изображении видно наличие более протяженной области с крупнозернистой структурой в зоне сварного шва. Максимальная ширина этой зоны в сварном шве, полученном без ультразвуковой обработки, составляет 210 мкм. Для сварного шва, подвергнутого воздействию ультразвуковых колебаний с частотой

22 кГц, ширина этой зоны уменьшается до 170 мкм. При обработке ультразвуком с частотой 80 кГц ширина этой зоны составляет всего 20–70 мкм, как показано на рис. 3, *д*. При введении акустических колебаний с частотой 100 кГц структура сварного шва становится однородной, а различные структурные зоны практически исчезают, что видно на рис. 3, *е*. Далее рассмотрим детальное исследование микроструктуры металла, полученного в результате сварки с использованием акустических колебаний разной частоты (рис. 4). На рис. 4, *а* показано наличие δ -феррита в микроструктуре сварного шва, который представлен сетчатой морфологией, причем размер его пластин достигает 50 мкм. Введение в зону расплава ультразвуковых колебаний частотой 15 кГц при лазерной сварке существенно изменяет характер формирования структуры. На рис. 4, *б* видно, что темные

и светлые полосы соответствуют областям аустенита и феррито-бейнитной смеси, что подтверждается результатами измерений микротвердости. В этих областях твердость снижена по сравнению с аустенитной матрицей.

Использование ультразвуковых колебаний частотой 22 кГц в расплавленной ванне при лазерной сварке приводит к значительному разрушению и фрагментации пластинчатого δ -феррита, что продемонстрировано на рис. 4, в. Размер δ -феррита при этом уменьшается до 5–10 мкм, что в 10 раз меньше по сравнению с образцами, сваренными без применения ультразвука. На рис. 4, г показано, что воздействие ультразвука с частотой 40 кГц приводит к обра-

зованию высокодисперсного игольчатого феррита, а также появляются небольшие участки бейнита. Твердость темных участков в этих зонах также повышена по сравнению с аустенитной матрицей.

Применение ультразвуковых колебаний с частотой 80 кГц, как показано на рис. 4, е, способствует значительному измельчению структуры. В этих образцах наблюдается наличие скелетного δ -феррита по всей линии сварки. Наконец, при воздействии акустических колебаний с частотой 100 кГц, как видно на рис. 4, е, происходит образование высокодисперсного игольчатого феррита, который присутствует на фоне аустенитной матрицы.

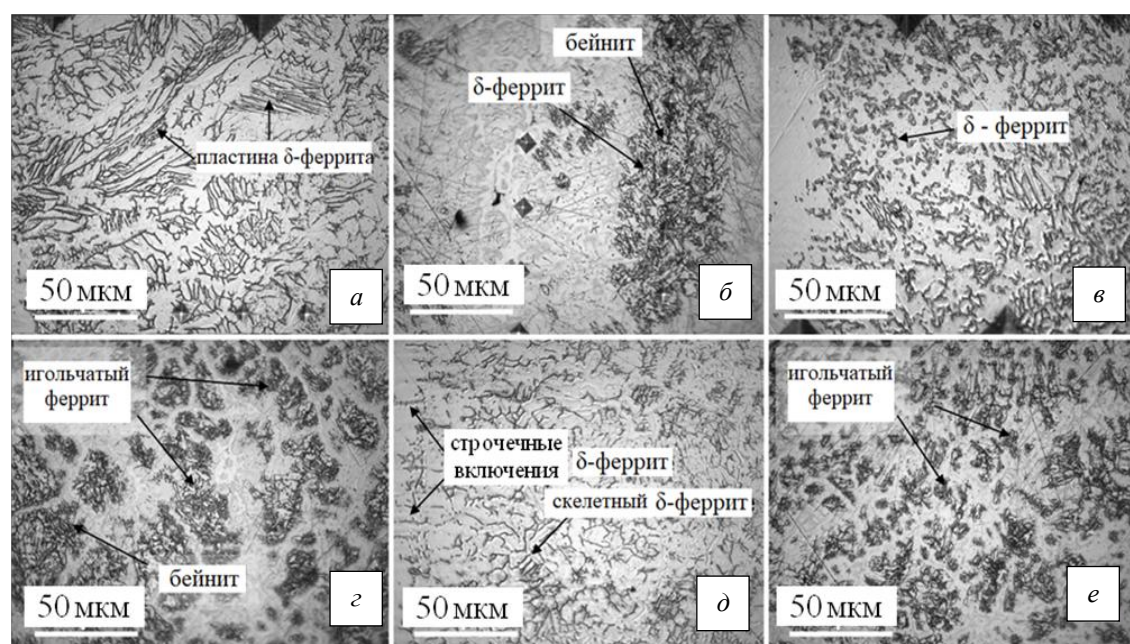


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения, полученного без применения акустических колебаний (а) и при разных частотах акустических колебаний: 15 кГц (б); 22 кГц (в); 40 кГц (г); 80 кГц (д); 100 кГц (е)

Для оценки влияния ультразвука на размеры и распределение твердости сварных соединений необходимо отдельно рассмотреть тип фаз, образующихся при акустической обработке сварных соединений. На рис. 5, а показано, что исходный металл содержит включения карбидов TiN и TiC, твердость которых в 10–12 раз превышает твердость α -фазы. Это свидетельствует о значительно большей твердости этих включений по сравнению с основным металлом. На рис. 5, б показано, что твердость пластинчатого феррита также выше, чем твердость аустенитной матрицы, что, в свою очередь, влияет на общую твердость сварного шва. Введение в процесс сварки акустических колебаний с частотой 15 кГц при-

водит к появлению химической неоднородности. На рис. 5, д, показано, что значение твердости бейнита выше по отношению к аустенитной матрице. Кроме того, на рис. 5, в видны крупные карбиды Ti(C,N), которые могут существенно влиять на физико-механические свойства сварного шва. На рис. 5, е можно наблюдать дисперсные глобулярные карбиды, образовавшиеся в металле швов, полученных лазерной сваркой под действием акустических колебаний с частотой 100 кГц. Это свидетельствует о том, что акустические колебания, вводимые в зону расплавленного металла, способствуют измельчению карбидов Ti(C,N), что может существенно влиять на качество сварки.

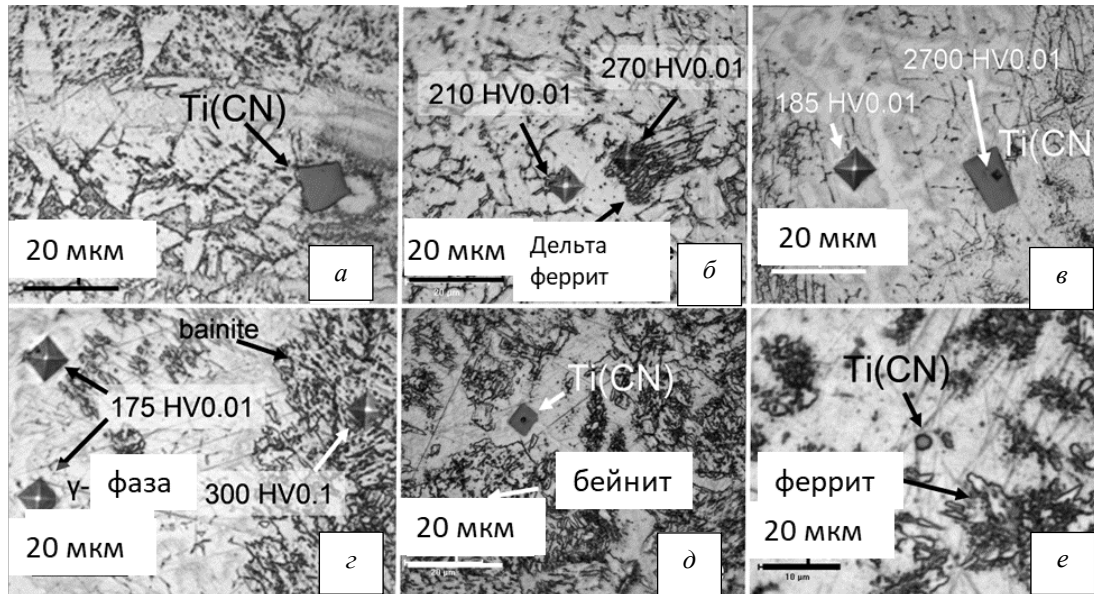


Рис. 5. Основной металл разной фазовой твердости из стали 12X18H10T (а), металл шва без акустики (б), 15 кГц (в, з), 40 кГц (д), 100 кГц (е)

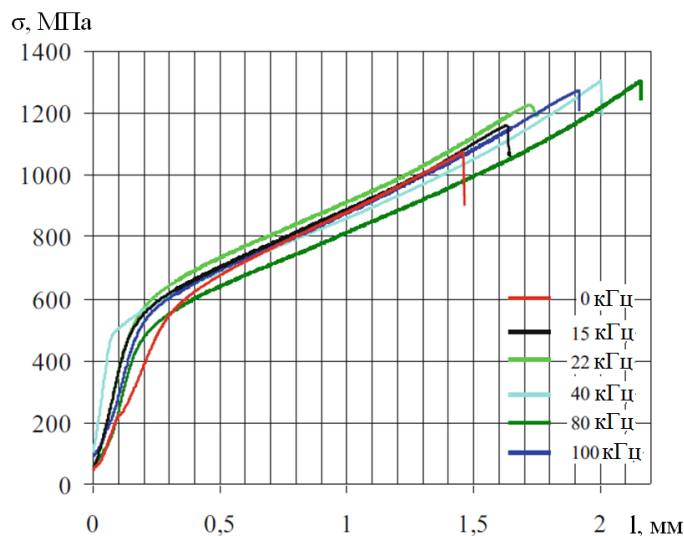


Рис. 6. Кривые трехточечного изгиба в координатах нагрузка-перемещение для образцов, сваренных при различных частотах ультразвуковой обработки сварного шва

Важным вопросом является то, как изменения микроструктуры сварного шва, вызванные ультразвуковой обработкой, влияют на его механические свойства. На рис. 6 показаны испытания сварных образцов на трехточечный изгиб, полученные при различных лазерно-акустических воздействиях. Кривая для образца, сваренного без акустического воздействия, показана красным цветом. Испытание на трехточечный изгиб показало, что все испытанные образцы имели хорошие пластические характеристики. Однако, как видно из рисунка, все образцы, сваренные с применением ультразвуковых колебаний, показали хорошую стойкость

к разрушению при изгибе. Максимальное значение прочности достигается при сварке образцов на частотах 80 и 40 кГц. Однако величина смещения образца, сваренного на частоте 80 кГц, имеет максимальное значение относительно других образцов. Снижение пластичности образца, сваренного при 40 и 100 кГц относительно образца, сваренного при 80 кГц можно объяснить наличием пор и трещин, как это было показано ранее. Видно, что напряжения и деформации образцов, сваренных с ультразвуковыми колебаниями частотой 80 кГц, соответственно в 1,3 и 1,5 раза выше по сравнению с образцом, сваренным без обработки ультра-

звуком. Предположительно, повышение пластичности и прочности связано с отмеченным выше снижением пористости, фрагментацией пластин δ -феррита и снижением химической неоднородности в сварном шве.

Выводы

1. Применение ультразвуковых колебаний частотой 80 кГц в процессе лазерной сварки позволяет получить металл сварного шва с однородной структурой и химическим составом по сечению. С ростом частоты колебаний средние значения твердости уменьшаются, а максимальное значение твердости достигается при лазерной сварке с акустическими колебаниями с частотой 22 кГц. При этом в структуре металла обнаруживается скелетный δ -феррит, присутствующий по всему сварному шву.

2. Кавитация, вызванная акустическими колебаниями в расплавленном металле, приводит к схлопыванию крупных пузырьков. При этом микропоры, образующиеся в результате кавитации, служат центрами кристаллизации, что может объяснить эффекты измельчения микроструктуры и уменьшение размеров ферритных пластин. Предполагается, что при лазерной сварке с частотой ультразвуковых колебаний 15 кГц происходит возникновение сонокапиллярного эффекта в жидком металле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Y. J. Chen, T. M. Yue, Z. N. Guo Laser joining of metals to plastics with ultrasound vibration Journal of Materials Processing Technology 2017; 249:441-451
2. D. M. Gureev Prospects for laser-ultrasound treatment for surface modification, welding modification, welding, and pattern

cutting, Journal of Russian Laser Research 1999;20:28-66

3. S. Yu. Tarasov, A. V. Vorontsov, S. V. Fortuna, V. E. Rubtsov, V. A. Krasnoveikin, E. A. Kolubaev Ultrasonic-assisted laser welding on AISI 321 stainless steel, Welding in the World 2019;63,3:875–886

4. Hung, J. C., Tsai, Y. P. and Hung, C. Development of a new apparatus for ultrasound vibration-assisted glass hot embossing process, Precision Engineering 2013;37:222–227.

5. Tsai, Y. P., Hung, J. C., Yin, L. C. and Hung, C. Ultrasound vibration-assisted optical glass hot embossing process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2012;60,12:1207–1213

6. Mousavi, S. A., Feizi, H. and Madoliat, R. Investigations on the effects of ultrasound vibrations in the extrusion process, Journal of Materials Processing Technology 2007;187:657–661.

7. Laugier, P., Haïat, G. Introduction to the Physics of Ultrasound, In Bone Quantitative Ultrasound, Springer, Dordrecht, Netherlands, 2011:29–45

8. Babitsky, V. I. and Kalashnikov, A. N. Ultrasound assisted turning of aviation materials, Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132,1 :3157–3167.

9. Liao, Y. S., Chen, Y. C. and Lin, H. M. Feasibility study of the ultrasound vibration assisted drilling of Inconel superalloy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007;47,12:1988–1996.

10. Meiyan Li, Bin Han, Yong Wang, Lixin Song, Lanyang Guo Investigation on laser cladding high-hardness nanoceramic coating assisted by ultrasonic vibration processing, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016;127, 11:4596-4600

11. Rosenberg D. Physics and technology of powerful ultrasound. Volume 2. Powerful ultrasonic fields / Rosenberg D. - M.: Book on Demand, 2012. - 268 p.

12. Dmitry G. Eskin, Jiawei Mi Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields, Part of the Springer Series in Materials Science book series (SSMATERIALS, volume 273) :2018,

13. Горунев, А. И. Лазерная сварка образцов, полученных методами аддитивного производства / А. И. Горунев, О. А. Нюхляев, О. В. Кудимов, А. Х. Гильмутдинов // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2022. – Т. 78. – № 1. – С. 52–56.