

Strength of copper joints obtained by ultrasonic welding using copper intermediate layers in different structure states

N. Yu. Parkhimovich^{†,1}, N. R. Yusupova², A. A. Nazarov^{1,2}

[†]pn@imsp.ru

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 S. Khalturin St., Ufa, 450001, Russia

²Bashkir State University, 32 Zaki Validi St., Ufa, 450076, Russia

Characteristics of solid state joints obtained by ultrasonic welding (USW) of commercially pure copper plate samples of 0.5 mm thickness, including samples welded with intermediate layers of commercial and ultrafine-grained (UFG) plates of the same material of 0.2 mm thickness, were studied. Welding regimes with processing times 1 and 2 s and static loads 5 and 7 kN at vibration amplitude about 15 μm were used. For each regime and sample type three samples were obtained and subjected to lap shear testing. Analysis of results has shown that at both values of static load the increase in processing time from 1 to 2 s leads to an increase of the strength of weld joints. While with the small welding duration the increase in the load does not lead to a change of the joint strength, with the longer welding time 2 s a noticeable increase of the joint strength with the static load is observed. For the given thickness of intermediate layers lap shear strength of joint does not depend on their presence and structure: for every sample type welded with the same regime the value of strength is the same within the margin of errors. However, presence of the intermediate layer qualitatively affects the elongation curve during shear testing: samples welded without an intermediate layer fail with practically instant simultaneous separation of joined surfaces after achievement of the maximum stress, whereas at the presence of an intermediate layer after achieving the maximum stress a smooth decrease of the stress occurs. This is related to the deformation of material in the area of joint. There are also differences observed in the macrostructure of sample surfaces in the area of failure after lap shear testing. The absence of the increase of joint strength in the presence of intermediate layers was explained by plastic deformation in the areas of stress concentration.

Keywords: ultrasonic welding, shear lap strength, ultrafine grained structure, copper.

УДК: 621.791.16+620.176.21+620.184.6

Прочность соединений меди, полученных ультразвуковой сваркой с использованием медных прокладок в различных структурных состояниях

Пархимович Н. Ю.^{†,1}, Юсупова Н. Р.², Назаров А. А.^{1,2}

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. С. Халтурина, 39, Уфа, 450001, Россия

²Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди, 32, Уфа, 450076, Россия

Исследованы характеристики твердофазного соединения, полученного ультразвуковой сваркой (УЗС) образцов промышленного листа технической чистой меди М1 толщиной 0.5 мм, в том числе с использованием прокладок из промышленного и ультрамелкозернистого (УМЗ) листов того же материала толщиной 0.2 мм. Для сварки были использованы различные режимы, различающиеся временем процесса (1 и 2 с), статической нагрузкой (5 и 7 кН) при амплитуде колебаний инструмента около 15 мкм. Для каждого режима и вида образцов были получены и испытаны на срез по три образца. Анализ результатов показал, что при обоих значениях статической нагрузки увеличение времени процесса от 1 до 2 с приводит к увеличению прочности. Если при малой длительности сварки повышение нагрузки практически не приводит к изменению прочности соединения, при большем времени сварки 2 с наблюдается заметное увеличение прочности со статической нагрузкой. Для данной толщины промежуточных прокладок прочность на срез не зависит от их наличия и структуры: для всех трех видов образцов, сваренных при одинаковых режимах, в пределах погрешностей прочность имеет одинаковое значение. При этом, однако,

наличие прослойки качественно меняет вид кривой растяжения при испытаниях на срез: образцы, сваренные без прокладок, разрушаются путем одновременного отрыва соединенных поверхностей друг от друга практически сразу после достижения максимального напряжения, тогда как при наличии прокладок после достижения максимального напряжения происходит плавное снижение напряжения, что связано с деформацией материала в области соединения. Различия наблюдаются также в макроструктуре поверхностей образцов в области соединения после испытаний. Отсутствие повышения прочности соединения при наличии прокладок объяснено пластической деформацией в зонах концентрации напряжений в них.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, прочность на срез, ультрамелкозернистая структура, медь.

1. Введение

Одним из высокоэффективных методов соединения различных материалов, в том числе металлов и сплавов, является ультразвуковая сварка (УЗС) [1, 2]. В отличие от УЗС пластмасс, для которой используются колебания, нормальные к плоскости соединяемых листов и приводящие к плавлению материала, УЗС металлов и сплавов осуществляется сдвиговыми колебаниями, происходящими параллельно плоскости прижатых друг к другу статическим давлением листов металлов. При этом температура в зоне сварки существенно ниже температуры плавления соединяемых материалов, поэтому УЗС металлов — это твердофазное соединение. Преимуществами УЗС по сравнению с другими методами твердофазного соединения являются отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности и использования вакуума, быстрота (процесс УЗС длится не более 1–2 с) и возможность соединения разнородных материалов. Основным недостатком этого метода является возможность сварки только тонких пластинок и фольг на небольшой площади. Поэтому УЗС была реализована в виде точечной или шовной сварки листовых материалов и достаточно тонких проводов [3, 4]. Однако недавно был изобретен метод ультразвуковой аддитивной технологии (ультразвуковой консолидации) металлов, который позволяет изготавливать крупногабаритные детали и конструкции путем последовательной ультразвуковой сварки металлических лент [5]. В большом количестве последующих работ был показано, что этот метод аддитивной технологии позволяет с высокой производительностью изготавливать различные изделия, включая композиты из разнородных материалов, с включением твердых частиц, упрочняющих волокон, оптоволокон и т. д. и, соответственно, имеет свою нишу среди аддитивных технологий [6–8]. В отличие от ряда других методов твердофазного соединения, как, например, диффузионной сварки, ультразвуковая консолидация пока не позволяет получать соединения с прочностью, приближающейся к прочности соединяемых материалов, поэтому исследованию связей между режимами консолидации и структурой, свойствами соединений посвящается возрастающее количество исследований [6–12]. Поскольку в основе метода лежит УЗС, в последние годы также возрос интерес к материаловедческим проблемам УЗС [13–19].

Одним из материалов, наиболее хорошо свариваемых ультразвуком, является медь [4, 15–17]. В зависимости

от режимов сварки (мощности ультразвука, длительности процесса сварки, статического давления), используемого инструмента, толщины листов и т. д., прочность на срез полученных точечной сваркой соединений меди может составлять величину порядка 1 МПа [15], 20–30 МПа [16] и до 130 МПа [17].

На примере разнородных соединений Cu-Al [18] и Ti-Al [19] было показано, что использование тех или иных промежуточных фольг может способствовать повышению прочности соединения на срез от нескольких десятков процентов до более чем двух раз. При диффузионной сварке значительное повышение качества соединения может быть достигнуто при использовании промежуточных фольг с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, которые в условиях сварки обладают более высокой пластичностью, чем крупнозернистые материалы [20, 21]. Наноструктурная медь обладает более высокой пластичностью, чем крупнозернистая, уже при комнатной температуре [22]. Поэтому представляет интерес исследование характеристик соединений меди, полученных ультразвуковой сваркой с использованием промежуточного слоя УМЗ меди.

Настоящая работа посвящена исследованию прочностных характеристик сварных соединений промышленных листов меди, полученных УЗС, в том числе с применением прокладок из листов меди с крупнозернистой и УМЗ структурой.

2. Материал и методики исследования

Для исследований была взята технически чистая медь марки М1 (чистота 99.9%). Исходные свариваемые заготовки в виде пластин 40×15×0.5 мм вырезали из промышленного листа меди в состоянии поставки. В качестве промежуточного слоя с крупнозернистой структурой использовали куски промышленного листа толщиной 0.2 мм. Образцы с УМЗ структурой для использования в качестве прокладок были получены методом кручения под высоким давлением (КВД) [23]. Данный метод позволяет сформировать микроструктуру меди со средним размером зерна менее 0.4 мкм [24, 25]. Диски толщиной около 1 мм и диаметром 12 мм были подвергнуты кручению на 5 оборотов под давлением 5 ГПа в установке типа наковальни Бриджмена с плоскими бойками, в результате чего были получены образцы диаметром 12 мм и толщиной около 0.2 мм [26]. Перед сваркой все поверхности шлифовали наждачной бумагой и промывали изопропиловым спиртом, затем высушивали.

УЗС осуществляли по схеме, изображенной на Рис. 1а,б. Два подлежащих сварке листа меди 1 последовательно располагали на наковальне сварочной установки 2 так, чтобы участки размером 15×15 мм на их концах перекрывались, как изображено на Рис. 1б, и прикрепляли к наковальне прижимными гайками. Волновод ультразвуковой установки 3 под действием статической нагрузки P прижимали сварочным наконечником к верхнему образцу. Под приложенной нагрузкой в течение времени сварки τ через волновод на образец воздействовали периодическими колебаниями с частотой 20 кГц и амплитудой смещений ξ_0 . Амплитуду смещений измеряли с помощью бесконтактного емкостного виброметра 4 [27]. При сварке с промежуточным слоем между листами помещали небольшой лист меди с крупнозернистой или УМЗ структурой и размером больше, чем площадь касания наконечника волновода, равная 7×6 мм.

При сварке были использованы следующие параметры: амплитуда смещений $\xi_0 \approx 15$ мкм, статическая нагрузка $P = 5$ и 7 кН, время сварки $\tau = 1$ и 2 с. С помощью УЗС были изготовлены три вида образцов: непосредственное соединение двух промышленных листов без промежуточного слоя (1), соединение листов через прослойку промышленного листа толщиной 0.2 мм (2) и соединение через прослойку УМЗ меди (3). Для каждого использованного режима сварки и вида были изготовлены и испытаны на срез по 3 образца.

Измерение прочности соединений осуществлялось путем механических испытаний полученных образцов на срез путем растяжения на испытательной машине Instron 5982 при комнатной температуре со скоростью движения траверсы 1 мм/мин. Схема испытаний ясна из Рис. 1б, где стрелками изображено направление растяжения образца. Предел прочности на срез сварного соединения определяли по формуле $\sigma_b = F_{\max} / S$, где

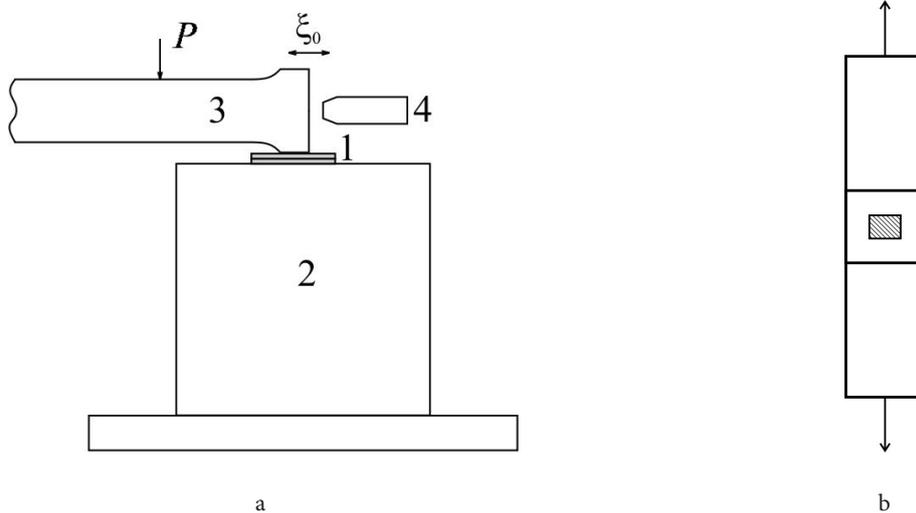


Рис. 1. Схемы ультразвуковой сварки металлических листов (а) и образцов для испытаний на срез, полученных сваркой (б). На (б) штриховкой указана площадь участка, на которой была осуществлена сварка, а стрелки показывают направление растяжения при испытаниях на срез.

Fig. 1. Schematics of ultrasonic welding of metallic sheets (a) and the samples for lap shear testing obtained by welding (b). On (b) the welded area is marked by hatching, the arrows show the tension direction during t shear test.

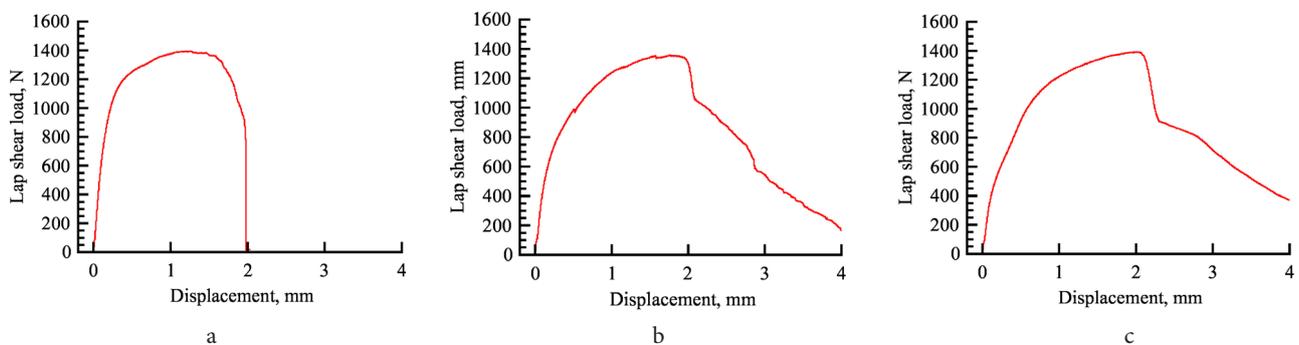


Рис. 2. Зависимости усилия деформирования от удлинения при испытаниях на срез образцов меди, полученных УЗС при статической нагрузке $P = 7$ кН в течение времени $\tau = 2$ с: образцы типа (1) без прокладок (а); образцы типа (2) с прокладкой из промышленного листа (б); образцы типа (3) с УМЗ прокладкой (с).

Fig. 2. Dependences of the deformation load on displacement during lap shear testing of copper samples ultrasonically welded under static load of $P = 7$ кН in time interval $\tau = 2$ s: type (1) samples without intermediate layer (a); type (2) samples with an intermediate layer of commercially pure copper (b); type (3) samples with an UFG intermediate layer (c).

S — площадь отпечатка от ультразвуковой сварки, а F_{\max} — максимальное усилие при механических испытаниях. Для всех образцов величина S соответствовала площади наконечника волновода и составляла около 42 мм². После механических испытаний проводили фрактографию разрушенных образцов с помощью оптического микроскопа.

3. Результаты и обсуждение

Типичные кривые деформирования (зависимости деформирующей силы от удлинения), полученные для образцов, сваренных в течение 2 с под статической нагрузкой 7 кН, приведены на Рис. 2. Для других режимов сварки кривые имеют аналогичный вид и отличаются количественными характеристиками прочности и максимального удлинения. Прочность соединений на срез σ_b была определена путем деления максимального значения деформирующей силы на площадь области сварки. Значения прочности на срез, полученные таким образом, собраны на Рис. 3.

Оптические фотографии поверхностей разрушения образцов, полученных при сварке в течение времени 2 с под нагрузкой 7 кН, приведены на Рис. 4.

Анализ результатов показывает следующее. Значительное влияние на прочность соединения оказывает время сварки. При статической нагрузке как 5 кН, так и 7 кН увеличение времени процесса от 1 до 2 с приводит к увеличению прочности. При этом влияние статической нагрузки зависит от времени сварки. При $\tau=1$ с повышение нагрузки от 5 до 7 кН практически не привело к изменению прочности соединения, тогда как при $\tau=2$ с при этом наблюдается заметное увеличение σ_b .

Как видно из Рис. 3, прочность на срез не зависит от наличия и вида промежуточной прослойки из того же материала: для всех трех видов образцов, сваренных при одинаковых режимах, в пределах погрешностей σ_b имеет одинаковое значение. При этом, однако, наличие прослойки качественно меняет вид кривой

зависимости нагрузки от удлинения при испытаниях на срез. Судя по кривым деформирования (Рис. 2), образцы, сваренные без прокладок, разрушаются путем одновременного отрыва соединенных поверхностей друг от друга практически сразу после достижения максимального напряжения (Рис. 2а), тогда как при наличии прокладок после достижения максимального напряжения происходит плавное снижение

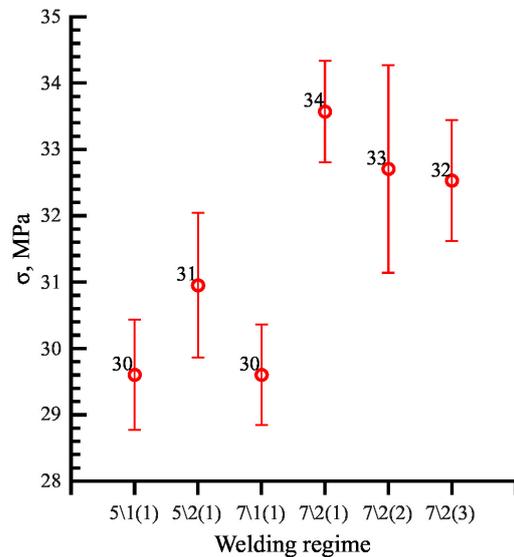


Рис. 3. Значения прочности на срез образцов меди различных типов, полученных путем УЗС по различным режимам. В обозначении режимов первая цифра соответствует статической нагрузке в килоньютонах. Вторая цифра соответствует времени сварки в с, цифра в скобках соответствует типу образца.

Fig. 3. Values of lap shear strength of copper samples of different types obtained with several regimes of ultrasonic welding. In the designations of regimes the first number corresponds to static load in kilonewtons. The second number corresponds to welding time in s, and the number in brackets corresponds to the type of the sample.

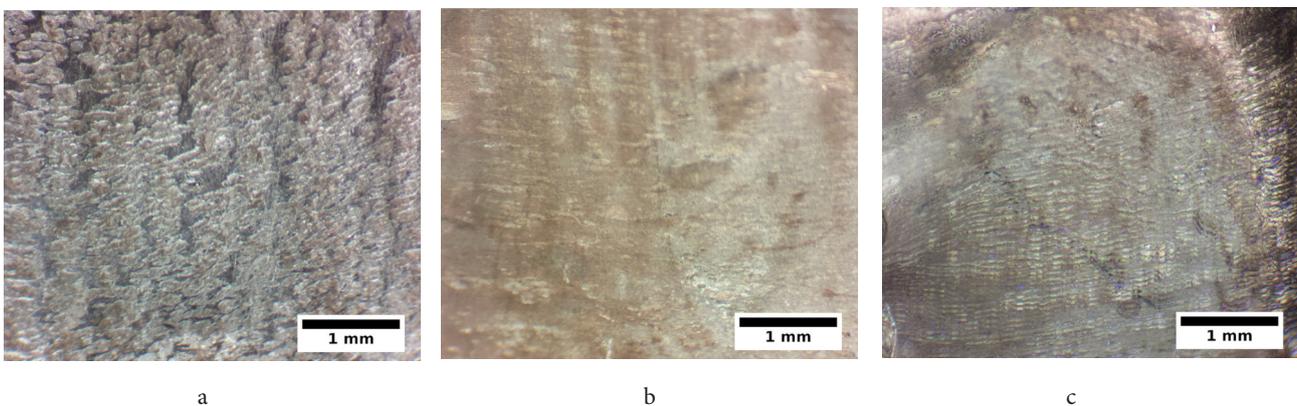


Рис. 4. (Color online) Макроструктура поверхности разрушения образцов, полученных путем УЗС при статической нагрузке 7 кН с течение времени 2 с, после испытаний на срез (верхняя пластина): образец типа (1) без прокладок (а); образец типа (2) с прокладкой из промышленного листа (b); образец типа (3) с УМЗ прокладкой (с).

Fig. 4. (Color online) Macrostructure of failure surfaces of the samples obtained by ultrasonic welding under static load of 7 kN in time interval 2 s after lap shear tests (the upper sheet): type (1) sample without intermediate layer (a); type (2) sample with intermediate layer of commercially pure copper (b); type (3) sample with intermediate layer of UFG copper (c).

напряжения, что, по всей видимости, связано с деформацией материала в области соединения. Различия наблюдаются также в макроструктуре поверхностей образцов в области соединения после испытаний. На изображениях поверхности разрушения образцов без прокладки после механических испытаний видно множество небольших участков (их линейный размер составляет до 0.3 мм) с темным контрастом (Рис. 4а). В этих участках, по-видимому, не произошло соединение материала пластин в процессе УЗС, в связи с чем физическая площадь контакта пластин оказывается меньше, чем полная площадь сварочного накоенника инструмента для УЗС. Доля несплошностей на приведенных изображениях составляет около 40%. На поверхности разрушения образцов, полученных УЗС с прокладками как из крупнозернистой, так и из УМЗ меди, такие несплошности не наблюдаются (Рис. 4б,с). Предположительно, прокладка в процессе УЗС заполнила данные несплошности, благодаря чему качество соединения возросло.

Отсутствие влияния прокладок на прочность соединения и, возможно, даже снижение прочности под их влиянием, можно объяснить следующим образом. Как показывают кривые нагружения, при использовании промежуточных прослоек максимальное напряжение при испытаниях на срез связано с началом пластической деформации в области соединения. В этом случае, по-видимому, пластическая деформация происходит не по всей площади контакта, а по краям, где имеет место концентрация напряжений, и, соответственно, она начинается при меньшем напряжении, чем напряжение среза сварного шва, полученного без прослойки. Поэтому, повышая качество соединения, промежуточные листы не добавляют соединению прочности на срез, но при этом такие соединения имеют более высокую пластичность.

Для того чтобы увеличить прочность соединения с использованием прокладок, по-видимому, необходимо использование промежуточных листов меньшей толщины, так как при этом промежуточный слой все еще имеет возможность заполнять несплошности при сварке, а распределение напряжений при испытаниях ближе к той, которая имеет место при испытаниях образцов, сваренных без прослоек.

Для более полного понимания роли промежуточных слоев, их толщины, структуры необходимы дальнейшие исследования.

4. Заключение

1. Прочность соединений меди, полученных УЗС, существенно зависит от времени сварки. При достаточном времени сварки (в данном случае $\tau = 2$ с), прочность заметно повышается при увеличении статической нагрузки. В данных исследованиях наибольший предел прочности, равный 34 МПа, достигнут для соединения, полученного УЗС в условиях статического давления 7 кН в течение 2 с.

2. При указанных режимах сварки наличие прокладки толщиной 0.2 мм и ее микроструктура не оказали

заметного влияния на прочностные свойства полученных образцов. Это может быть объяснено наблюдаемым отличием кривой нагружения образцов при испытаниях на срез, которые показывают наличие значительной пластической деформации после достижения максимального напряжения.

3. По-видимому, для повышения прочности соединения предпочтительным является использование более тонких промежуточных листов.

Благодарности/Acknowledgements. Настоящая работа была поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126). Микроструктурные исследования и механические испытания проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов». / The present work was supported by the Russian Science Foundation (grant #16-19-10126). Microstructural studies and mechanical tests were carried out in the CCU of IMSP RAS "Structural and physical-mechanical studies of materials".

Литература/References

1. Yu.V. Kholopov. Ultrasonic welding of metals and plastics. Leningrad, Mashinostroyeniye (1988) 224 p. (in Russian) [Ю.В. Холопов. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Ленинград, Машиностроение (1988) 224 с].
2. A.M. Mitzkevich. In: Physics and Technique of Power Ultrasound. V.III. Physical Bases of Ultrasonic Technology (ed. by L.D. Rosenberg). Moscow, Nauka (1970) p. 71–164. (in Russian) [А.М. Мицкевич. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Т. III. Физические основы ультразвуковой технологии (под ред. Л.Д. Розенберга). Москва, Наука (1970) с. 71–164].
3. K. Graff. In: New Developments in Advanced Welding (ed. by N. Ahmed). Cambridge, Woodhead Publishing (2005) p. 241–269. [Crossref](#)
4. M.P. Matheny, K.F. Graff. In: Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound (ed. by J.A. Gallego-Juarez, K.F. Graff). Cambridge, Woodhead Publishing (2015) p. 259–293.
5. US Patent #6519500, 23.03.2000.
6. R.J. Friel, R.A. Harris. The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM). Procedia CIRP. 6, 35 (2013). [Crossref](#)
7. R.J. Friel. In: Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound (ed. by J.A. Gallego-Juarez, K.F. Graff). Cambridge, Woodhead Publishing (2015) p. 313–335. [Crossref](#)
8. A. Hehr, M. Norfolk. Rapid Prototyping J. 26 (3), 445 (2019). [Crossref](#)
9. E. Mariani, E. Ghassemieh. Acta Mater. 58 (7), 2492 (2010). [Crossref](#)
10. P.J. Wolcott, N. Sridharan, S.S. Babu, A. Miriev, N. Frage, M.J. Dapino. Sci. Technol. Weld. Join. 21 (2), 114 (2016). [Crossref](#)
11. P.J. Wolcott, A. Hehr, C. Pawlowski, M.J. Dapino. J. Mater. Proc. Technol. 233, 44 (2016). [Crossref](#)

12. Z.L. Ni, F.X. Ye. J. Manuf. Technol. 35, 580 (2018). [Crossref](#)
13. H. T. Fujii, H. Endo, Y. S. Sato, H. Kokawa. Mater. Charact. 139, 233 (2018). [Crossref](#)
14. L. Zhou, J. Min, W.X. He, Y.X. Huang, X.G. Song. J. Manuf. Proc. 33, 64 (2018). [Crossref](#)
15. S. Elangovan, K. Prakasan, V. Jaiganesh. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 51, 163 (2010). [Crossref](#)
16. Z. S. Al Sarraf. J. Appl. Mech. Eng. 4 (5), 1000183 (2015). [Crossref](#)
17. J. Yang, B. Cao, Q. Lu. Materials. 10 (2), 193 (2017). [Crossref](#)
18. R. Balasundaram, V.K. Patel, S.D. Bholen, D.L. Chen.. Mater. Sci. Eng. A. 607, 277 (2014). [Crossref](#)
19. H. M. Zhang, Y.J. Chao, Z. Luo. Sci. Technol. Weld. Join. 22 (1), 79 (2017). [Crossref](#)
20. E. V. Valitova, A. Kh. Akhunova, V. A. Valitov, S. V. Dmitriev, R. Ya. Lutfullin, M. Kh. Muhametrahimov. Lett. Mater. 4 (3), 190 (2014). (in Russian) [Э. В. Валитова, А. Х. Ахунова, В. А. Валитов, Р. Я. Лутфуллин, С. В. Дмитриев, М. Х. Мухаметрахимов. Письма о материалах. 4 (3), 190 (2014).] [Crossref](#)
21. M. Kh. Mukhametrakhimov. Lett. Mater. 7 (2), 193 (2017). (in Russian) [М. Х. Мухаметрахимов. Письма о материалах 7 (2), 193 (2017).] [Crossref](#)
22. L. Lu, M. L. Sui, K. Lu. Science. 287 (5457), 1463 (2000). [Crossref](#)
23. A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon. Progr. Mater. Sci. 53 (6), 893 (2008). [Crossref](#)
24. A. P. Zhilyaev, I. Shakhova, A. Belyakov, R. Kaibyshev, T. G. Langdon. J. Mater. Sci. 49 (5), 2270 (2014). [Crossref](#)
25. N. Lugo, N. Llorca, J.M. Cabrera, Z. Horita. Mater. Sci. Eng. A. 477 (1–2), 366 (2008). [Crossref](#)
26. R. K. Khisamov, K. S. Nazarov, A. V. Irzhak, R. U. Shayakhmetov, I. I. Musabirov, R. R. Timirayev, Y. M. Yumaguzin, R. R. Mulyukov. Lett. Mater. 9 (2), 212 (2019). [Crossref](#)
27. N. V. Dezhkunov. Contactless vibrometer (2020). [Н. В. Дежкунов. Бесконтактный виброметр (2020).] <https://cavitation.bsuir.by/beskontaktnyy-vibrometr>