

Микроструктура и прочность соединений листов никеля, полученных ультразвуковой сваркой

© 2021

*Шаяхметова Эльвина Рафитовна**¹, аспирант, стажер-исследователь
*Мурзинова Мария Александровна*², кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
*Назаров Айрат Ахметович*³, доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе

Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, Уфа (Россия)

*E-mail: elvina1408@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1659-9922>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4418-3529>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7241-9386>

Аннотация: Ультразвуковая сварка (УЗС) является одним из методов получения твердофазных соединений тонких металлических листов, который в перспективе может использоваться для получения слоистых композиционных материалов, для аддитивного производства и реновации металлических изделий. Качество соединений зависит как от условий обработки, так и от свойств свариваемых металлов и сплавов. В настоящее время мало изучены условия УЗС, свойства и структура сварных соединений прочных металлов, в частности никеля. В работе исследовалось влияние величины сжимающей нагрузки на разрушающие усилия и структуру соединений отожженных листов никеля толщиной 0,5 мм, полученных точечной УЗС. УЗС проводили при частоте колебаний 20 кГц амплитудой 15 мкм, длительность обработки составляла 2 с. Величину сжимающей нагрузки варьировали от 3,5 до 7 кН. Показано, что с увеличением сжимающей нагрузки в рассмотренном диапазоне значений усилия разрушения сварных соединений возрастают, достигают максимума, а затем снижаются. Наиболее высокие разрушающие усилия – 1950 Н – демонстрировали соединения, полученные при сжимающей нагрузке 6 кН. Вблизи контакта свариваемых поверхностей наблюдается зона термомеханического влияния с градиентной микроструктурой. В слое толщиной 10–20 мкм происходит преобразование исходной крупнозернистой структуры никеля в ультрамелкозернистую с размером зерен менее 1 мкм. Ультрамелкозернистый слой граничит с кристаллитами, размеры которых составляют несколько микрометров и увеличиваются по мере удаления от поверхности контакта свариваемых листов. Результаты механических испытаний и структурных исследований сравниваются с данными, полученными после УЗС сплавов никеля, алюминия и меди.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка; никель; ультрамелкозернистая структура.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН. Микроструктурные исследования и механические испытания проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

Для цитирования: Шаяхметова Э.Р., Мурзинова М.А., Назаров А.А. Микроструктура и прочность соединений листов никеля, полученных ультразвуковой сваркой // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 2. С. 75–81. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-75-81.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка экологически чистых и энергосберегающих технологий является одним из важнейших направлений развития науки и техники. Ультразвуковая сварка (УЗС) металлов относится именно к таким технологиям, поскольку сварные швы выполняются без расходуемых материалов (электродов, припоя или присадок), которые обычно используются при соединении металлов, и с гораздо меньшим потреблением энергии, чем при других видах сварки [1; 2]. К достоинствам УЗС относится и высокая производительность процесса: обычно длительность ультразвукового воздействия не превышает нескольких секунд. К недостаткам метода следует отнести ограниченность габаритов соединяемых материалов: УЗС позволяет приваривать листы

толщиной до 1–2 мм и проволоки диаметром до нескольких мм [3–5].

Ультразвуковая сварка – это метод соединения металлов в твердом состоянии. УЗС осуществляется путем приложения высокочастотных сдвиговых колебаний к привариваемой заготовке, прижатой к другой детали статической нагрузкой. Первые работы в области УЗС металлов были выполнены в середине XX века и обобщены в работах [5; 6]. Было показано, что УЗС позволяет получать соединения между многими металлами и сплавами. Однако соединения удовлетворительного качества были получены между мягкими металлами, такими как алюминий [2; 7; 8] или медь [3; 9; 10], что и предопределило использование УЗС при изготовлении контактов из тонких фольг и проволок этих металлов [3; 10].

В последние годы интерес к УЗС существенно возрос, что объясняется появлением мощных и стабильных ультразвуковых генераторов, которые позволяют увеличивать толщину свариваемых листов или площадь сварного соединения, получать соединения, в том числе разнородные, прочных металлов и сплавов [10]. Кроме того, на основе шовной ультразвуковой сварки металлических листов недавно был создан новый метод аддитивной технологии – ультразвуковая консолидация, которая позволяет получать объемные металлические изделия, слоистые композиционные материалы и металломатричные композиты с внедренными упрочняющими волокнами или частицами. Впервые ультразвуковая аддитивная технология (УАТ) была предложена в работе Д. Уайта [11]. Ее преимущество перед другими методами аддитивного производства заключается в использовании листовых полуфабрикатов, а также в том, что в процессе УАТ не происходит плавление материала. Это существенно повышает скорость изготовления изделий и снижает энергоемкость технологии по сравнению с методами, использующими порошки или проволоку [12]. На сегодняшний день проведено довольно много исследований по ультразвуковой консолидации для получения объемных образцов путем шовной сварки однородных и разнородных пар металлов, таких как Al-Al [13], Cu-Cu [14], Ti-Al [15] и др. В работе [16] авторами был получен композит с матрицей из сплава алюминия, армированный волокнами SiC. Ультразвуковая аддитивная технология является многообещающей для создания композитных материалов путем внедрения различных армирующих волокон между металлическими слоями [12], а также может быть использована в технологиях реновации металлических изделий [17]. Последние достижения в этой области были обобщены сотрудниками фирмы Fabrisonic, впервые изготовившей оборудование для УАТ, в статье [12].

Механизм ультразвуковой сварки заключается в том, что в зоне контакта под действием сжимающей силы и ультразвуковых колебаний происходят разрушение окисных слоев, пластическая деформация выступов на поверхности, разогрев, сближение соединяемых поверхностей и их схватывание [2; 5; 6]. Площадь схватывания во многом определяет прочность полученного соединения и зависит от условий сварки: частоты и амплитуды колебаний, длительности обработки, величины сжимающей силы, а также от механических и физических свойств свариваемых металлов. Частота колебаний при УЗС обычно определяется характеристиками используемой установки и, как правило, находится в интервале 20–40 кГц, а амплитуда колебаний и время сварки составляют 10–50 мкм и 0,5–2 с соответственно [3]. Величина сжимающей силы может варьироваться в широких пределах в зависимости от установки, толщины привариваемого листа и его прочности. Повышение температуры в зоне контакта и высокоскоростная знакопеременная сдвиговая деформация приводят к структурным изменениям в свариваемых материалах, которые не только влияют на прочность соединений [8; 9; 18], но и лежат в основе механизма формирования соединения [19]. Время сварки и подводимая мощность определяют энергию сварки, и, как правило, в цитированных выше работах в основном исследовано влияние энергии сварки на прочность соединений, полученных

ультразвуковой сваркой. Установлено, что прочность сварного шва, обычно измеряемая путем испытаний на срез, увеличивается с увеличением энергии сварки.

Несмотря на значительное количество структурных исследований, физические принципы формирования соединений при УЗС окончательно не установлены. Отмечается возможность образования соединений как за счет механического перемешивания слоев металлов в зоне контакта (обычно при высоких энергиях сварки) [2], так и за счет развития деформационных и диффузионных процессов [19]. Так, например, в работе [17] на основании исследований консолидации алюминиевых сплавов 6061O авторы предположили, что во время сварки крупнозернистых листов из-за теплоты, выделяемой за счет трения и пластической деформации, происходит непрерывная динамическая рекристаллизация.

Необходимо отметить, что перечисленные исследования выполнены преимущественно на сплавах алюминия и меди. Исследования более прочных металлов весьма ограничены. В частности, ультразвуковой сварке никеля посвящена одна работа [20], в которой разработан соответствующий инструмент и исследована прочность соединения листов толщиной 0,1 мм, полученных при различных значениях амплитуды ультразвука и сжимающего давления. Исследования структурных изменений при сварке, которые являются определяющими для качества соединения, отсутствуют.

Цель исследования – оценка влияния статической сжимающей нагрузки на прочность соединений листов никеля, полученных УЗС, и их микроструктуру.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования был выбран отожженный лист никеля технической чистоты марки НП2 толщиной 0,5 мм. Из листа были вырезаны заготовки длиной 50 мм и шириной 20 мм. Участки заготовок, в которых предполагалось соединение, очищались путем шлифовки наждачной бумагой, затем промывались изопропиловым спиртом и сушились. Первый лист клался на наковальню, на которой были нанесены бороздки, перпендикулярные направлению колебаний, на нее «внахлест» клался второй лист так, чтобы соприкасались очищенные участки, и образцы прижимались наконечником сварочного инструмента к наковальне. Сварочный наконечник имел зубчатую поверхность прямоугольной формы размерами 4,5×6 мм². Давление на наконечник осуществлялось прессом, передающим статическую нагрузку примерно на середину сварочного инструмента, где находился узел колебаний. Величину статической сжимающей нагрузки (P) варьировали от 3,5 до 7 кН. Резонансная частота колебательной системы составляла 20 кГц. Амплитуда колебаний сварочного наконечника в процессе сварки контролировалась емкостным виброметром и составляла 15 мкм, время сварки – 2 с. В результате сварки были получены образцы соединения, один из которых изображен на рис. 1.

Испытания сварных соединений на срез осуществлялись путем растяжения образцов в клиновых захватах на машине Instron 5982 при комнатной температуре со скоростью движения траверсы 0,5 мм/мин. Для каждого режима сварки было испытано не менее трех образцов.

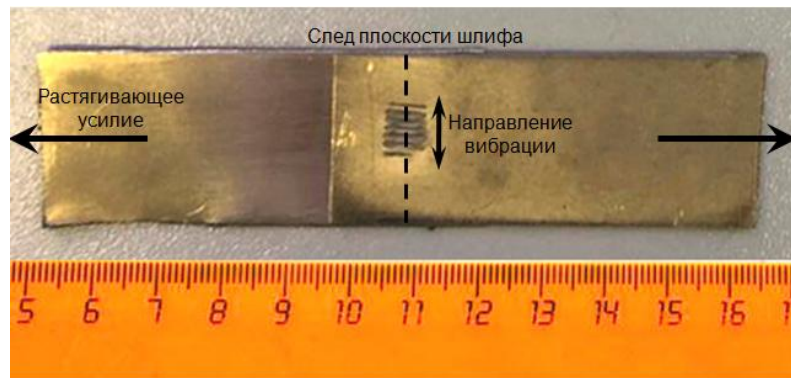


Рис. 1. Общий вид сваренного образца
Fig. 1. General view of a welded sample

За погрешность измерений принимали величину стандартной ошибки. Микроструктуру исследовали в поперечном сечении исходных заготовок и сварных соединений на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMH FEG в режиме обратно рассеянных электронов. На финишном этапе обработки шлифы механически полировали на суспензии с размерами частиц абразива 0,05 мкм, не подвергая травлению, которое может существенно увеличивать размеры пор и несплошностей в сварном соединении. Количественный микроструктурный анализ выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 21073-75, за величину зерна (d) принимали его диаметр.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В таблице 1 представлены результаты механических испытаний. Видно, что увеличение P от 3,5 до 7 кН приводит к немонокотному изменению свойств полученных сварных соединений. Наиболее высокие значения усилий разрушения сварной точки достигаются, если УЗС проводили при величинах сжимающей нагрузки P от 4,5 до 6 кН.

Структурные наблюдения показали (рис. 2), что получить бездефектные соединения при выбранных условиях сварки не удалось: в зоне контакта присутствуют несплошности, размеры которых в поперечном направлении составляют 1–3 мкм, а в продольном могут достигать 30 мкм. В зоне контакта происходят существенные структурные изменения. На рис. 2 а показана микроструктура исходного листа, где наблюдаются крупные зерна ($d_{cp}=20\pm 3$ мкм), содержащие границы двойников. На рис. 2 б, 2 с представлена микроструктура

в зоне соединения образцов, полученных при $P=4,5$ и 6,0 кН соответственно. В обоих случаях вблизи зоны контакта сваренных заготовок присутствует слой шириной 10–20 мкм с ультрамелкозернистой структурой ($d < 1$ мкм). Рядом с ультрамелкозернистым слоем наблюдаются разориентированные кристаллиты размерами до 10 мкм. По мере удаления от зоны контакта их размер возрастает, приближаясь к размеру зерен в исходном листе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перед тем как перейти к обсуждению полученных результатов, поясним, что оценка прочности соединений, полученных точечной сваркой, по величине усилий разрушения сварной точки на сдвиг/срез является нормативным методом испытаний [21], поскольку при таком виде нагружения накоплено наибольшее количество экспериментальных данных, а сами испытания предельно просты. Сравнение таких экспериментальных данных считают допустимым, если толщина свариваемых листов и размеры сварных точек близки.

Обнаруженное в настоящей работе немонокотное изменение прочности соединений листов никеля с увеличением сжимающей нагрузки (таблица 1) качественно согласуется с результатами, полученными после УЗС сплавов алюминия и меди [22; 23]. Рост прочности при возрастании P обычно объясняют увеличением площади схватывания в зоне контакта. Причина снижения прочности при больших сжимающих усилиях имеет разную природу для двух различающихся мод разрушения соединения при испытаниях на срез. Когда при сварке значительно уменьшается толщина листов, на краях сварной точки происходит концентрация

Таблица 1. Влияние величины сжимающей нагрузки на усилия разрушения соединений листов никеля, полученных УЗС
Table 1. The influence of the compressive load magnitude on the lap shear strength of joints of nickel sheets produced by USW

P (кН)	3,5	4,5	5,0	6,0	7,0
Усилие разрушения (Н)	1640±24	1841±28	1820±35	1953±30	1660±95

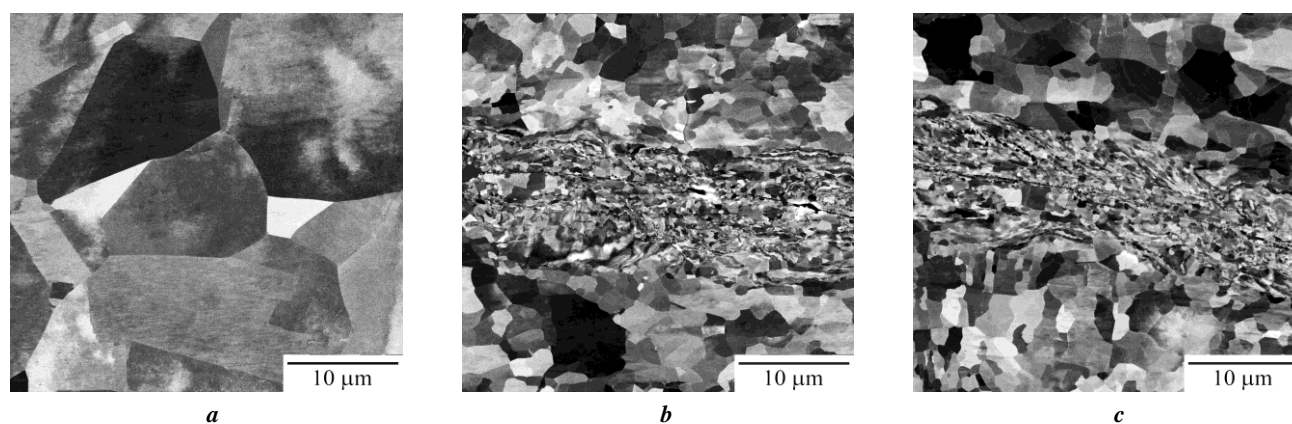


Рис. 2. Микроструктура листа никеля в исходном состоянии (а), после УЗС при $P=4,5$ кН (b), при $P=6,0$ кН (c)
Fig. 2. The microstructure of a nickel sheet in the initial state (a), after USW at $P=4.5$ kN (b), at $P=6.0$ kN (c)

напряжений, и соединение разрушается путем отрыва сварной точки. В таких случаях пиковая нагрузка при испытании на срез не дает информации об истинной прочности соединения, которая может быть значительно выше, чем измеряемая величина. В проведенных в данной работе испытаниях все образцы разрушались по другой моде – по границе раздела. В этом случае уменьшение прочности соединения объясняется тем, что излишне высокое давление в процессе сварки затрудняет взаимное перемещение и трение поверхностей соединяемых листов. Деформация в области сварного шва приобретает преимущественно упругий характер, соответственно, уменьшаются производство тепла и пластическая деформация неровностей, подавляя схватывание материала [2].

Несмотря на присутствие дефектов в зоне контакта, сварные соединения, полученные в данной работе, продемонстрировали удовлетворительную прочность. Усилия разрушения соединений (таблица 1) оказались выше, чем у соединений листов (толщиной 0,51 мм) сплава Inconel (980 Н), но ниже, чем у соединений листов сплава K-Monel (3025 Н) [6]. Отсутствие в работе [6] информации о режимах УЗС не позволяет понять причины столь значительных различий в прочности соединений сплавов на основе никеля.

Подробное исследование влияния параметров УЗС на величину усилий разрушения сварной точки листов никеля толщиной 0,1 мм выполнено в работе [20]. Авторы обнаружили монотонное увеличение прочности сварных соединений до 220 Н при увеличении амплитуды колебаний и сжимающих усилий. Однако пятикратная разница в толщине свариваемых листов и существенные отличия условий проведения УЗС не позволяют провести корректное сравнение результатов данного исследования и работы [20].

Краткая информация о микроструктуре никеля после УЗС со сталями представлена в работе [24]. На изображениях зоны соединения в слое никеля наблюдаются области с мелкими кристаллами. Однако авторы этой работы не анализируют микроструктурные изменения в свариваемых материалах, концентрируя внимание на появлении в зоне соединения частиц износа, которых мы не наблюдали.

Изменения микроструктуры после УЗС зависят от режимов обработки, исходной микроструктуры и свойств (механических и физических) свариваемых металлов и могут быть весьма разнообразны: наблюдали как существенное измельчение зерен [7–9], так и их рост [23; 25; 26], формирование микротекстуры сдвига [25–27] и рекристаллизации [7–9]. Закономерности структурных изменений при УЗС остаются предметом дискуссии и требуют систематического изучения.

Таким образом, результаты проведенного исследования показывают, что путем ультразвуковой сварки листов никеля толщиной 0,5 мм можно получить соединения, разрушающиеся при усилии до 1950 Н, что с учетом площади наконечника ($S=27$ мм²) означает, что прочность соединений на срез составляет величину не менее 70 МПа. Полученные значения превышают многие результаты, полученные при сварке листов алюминия аналогичной толщины [4], а также алюминия с никелем [28].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Точечная ультразвуковая сварка позволяет получить соединения листов никеля толщиной 0,5 мм, которые разрушаются при усилиях 1800–1950 Н. В процессе ультразвуковой сварки, ввиду интенсивного трения и локализованной высокоскоростной пластической деформации, в зоне сварного соединения исходная крупнозернистая структура листов преобразуется в ультрамелкозернистую структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 26. P. 295–322.
2. Bakavos D., Prangnell P.B. Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet // *Materials Science and Engineering A*. 2010. Vol. 527. № 23. P. 6320–6334.

3. Matheny M.P., Graff K.F. Ultrasonic welding of metals // *Power ultrasonics*. Woodhead: Cambridge, 2015. P. 259–293.
4. Ni Z.L., Ye F.X. Ultrasonic spot welding of aluminum alloys: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 35. P. 580–594.
5. Силин Л.Л. Ультразвуковая сварка: соединение металлов в твердом состоянии и улучшение качества сварных швов. М.: Машгиз, 1962. 252 с.
6. Devine J. Ultrasonic welding. Mechanical properties // *ASM Handbook. Welding, Brazing, and Soldering*. 1994. Vol. 6. P. 900–910.
7. Haddadi F., Tsvoulas D. Grain structure, texture and mechanical property evolution of automotive aluminium sheet during high power ultrasonic welding // *Materials Characterization*. 2016. Vol. 118. P. 340–351.
8. Peng H., Chen D., Jiang X. Microstructure and mechanical properties of an ultrasonic spot welded aluminum alloy: the effect of welding energy // *Materials*. 2017. Vol. 10. № 5. Article number 449.
9. Yang J., Cao B., Lu Q. The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints // *Materials*. 2017. Vol. 10. № 2. Article number 193.
10. Graff K. Ultrasonic metal welding // *New Developments in Advanced Welding*. Woodhead: Cambridge, 2005. P. 241–269.
11. White D. Ultrasonic Object Consolidation. United States Patent № 6519500.
12. Hehr A., Norfolk M. A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing // *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Vol. 26. № 3. P. 445–458. DOI: [10.1108/RPJ-03-2019-0056](https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2019-0056).
13. Shimizu S., Fujii H.T., Sato Y.S., Kokawa H., Sriraman M.R., Babu S.S. Mechanism of weld formation during very-high-power ultrasonic additive manufacturing of Al alloy 6061 // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 74. P. 234–243.
14. Sriraman M.R., Babu S.S., Short M. Bonding characteristics during very high power ultrasonic additive manufacturing of copper // *Scripta Materialia*. 2010. Vol. 62. № 8. P. 560–563.
15. Wolcott P.J., Sridharan N., Babu S.S., Miriyev A., Frage N., Dapino M.J. Characterisation of Al–Ti dissimilar material joints fabricated using ultrasonic additive manufacturing // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016. Vol. 21. № 2. P. 114–123.
16. Li D., Soar R.C. Characterization of process for embedding SiC fibers in Al 6061 O matrix through ultrasonic consolidation // *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*. 2009. Vol. 131. № 2. P. 0210161–0210166. DOI: [10.1115/1.3030946](https://doi.org/10.1115/1.3030946).
17. Mariani E., Ghassemieh E. Microstructure evolution of 6061 O Al alloy during ultrasonic consolidation: An insight from electron backscatter diffraction // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. № 7. P. 2492–2503. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.12.035](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.12.035).
18. Mirza F.A., Macwan A., Bhole S.D., Chen D.L. Microstructure and fatigue properties of ultrasonic spot welded joints of aluminum 5754 alloy // *JOM*. 2016. Vol. 68. № 5. P. 1465–1475.
19. Sanga B., Wattal R., Nagesh D.S. Mechanism of Joint Formation and Characteristics of Interface in Ultrasonic welding: Literature Review // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2018. Vol. 6. № 1. P. 107–119. DOI: [10.21533/pen.v6i1.158.107](https://doi.org/10.21533/pen.v6i1.158.107).
20. Park D.S., Kim J.H., Seo J.S. Ultrasonic welding of Ni thin sheet // *International Journal of Mining, Metallurgy and Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 1. № 2. P. 168–172.
21. Николаев Г.А. Сварка в машиностроении: справочник. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.
22. Lee S.S., Kim T.H., Hu S.J., Cai W.W., Abell J.A., Li J. Characterization of joint quality in ultrasonic welding of battery tabs // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of The ASME*. 2013. Vol. 135. № 2. Article number 012004. DOI: [10.1115/1.4023364](https://doi.org/10.1115/1.4023364).
23. Su Z., Zhu Z., Zhang Y., Zhang H., Xiao Q. Recrystallization behavior of a pure Cu connection interface with ultrasonic welding // *Metals*. 2021. Vol. 11. P. 1–17. DOI: [10.3390/met11010061](https://doi.org/10.3390/met11010061).
24. Lin J.-Y., Nambu S., Koseki T. Evolution of bonding interface during ultrasonic welding between Ni and steels with various microstructure // *ISIJ International*. 2020. Vol. 60. № 2. P. 330–336.
25. Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Microstructure and properties of solid state joints of titanium sheets produced by ultrasonic welding // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1008. № 1. Article number 012007. DOI: [10.1088/1757-899X/1008/1/012007](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1008/1/012007).
26. Patel V.K., Bhole S.D., Chen D.L. Influence of ultrasonic spot welding on microstructure in a magnesium alloy // *Scripta Materialia*. 2011. Vol. 65. № 10. P. 911–914.
27. Jiang Y., Chen Z., Zhan C., Chen T., Wang R., Liu Ch. Adiabatic shear localization in pure titanium deformed by dynamic loading: Microstructure and microtexture characteristic // *Materials Science and Engineering A*. 2015. Vol. 640. P. 436–442. DOI: [10.1016/j.msea.2015.06.028](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.028).
28. Ni Z.L., Ye F.X. Weldability and mechanical properties of ultrasonic welded aluminum to nickel joints // *Materials Letters*. 2016. Vol. 185. P. 204–207.

REFERENCES

1. Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 26, pp. 295–322.
2. Bakavos D., Prangnell P.B. Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet. *Materials Science and Engineering A*, 2010, vol. 527, no. 23, pp. 6320–6334.
3. Matheny M.P., Graff K.F. Ultrasonic welding of metals. *Power ultrasonics*. Woodhead, Cambridge Publ., 2015, pp. 259–293.
4. Ni Z.L., Ye F.X. Ultrasonic spot welding of aluminum alloys: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 35, pp. 580–594.

5. Silin L.L. *Ultrazvukovaya svarka: soedinenie metallov v tverdom sostoyanii i uluchshenie kachestva svarnykh shvov* [Ultrasonic welding: the connection of metals in the solid state and welded seams quality improvement]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 252 p.
6. Devine J. Ultrasonic welding. Mechanical properties. *ASM Handbook. Welding, Brazing, and Soldering*, 1994, vol. 6, pp. 900–910.
7. Haddadi F., Tsivoulas D. Grain structure, texture and mechanical property evolution of automotive aluminium sheet during high power ultrasonic welding. *Materials Characterization*, 2016, vol. 118, pp. 340–351.
8. Peng H., Chen D., Jiang X. Microstructure and mechanical properties of an ultrasonic spot welded aluminum alloy: the effect of welding energy. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 5, article number 449.
9. Yang J., Cao B., Lu Q. The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 2, article number 193.
10. Graff K. Ultrasonic metal welding. *New Developments in Advanced Welding*. Woodhead, Cambridge Publ., 2005, pp. 241–269.
11. White D. *Ultrasonic Object Consolidation*. United States Patent № 6519500.
12. Hehr A., Norfolk M. A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 445–458. DOI: [10.1108/RPJ-03-2019-0056](https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2019-0056).
13. Shimizu S., Fujii H.T., Sato Y.S., Kokawa H., Sriraman M.R., Babu S.S. Mechanism of weld formation during very-high-power ultrasonic additive manufacturing of Al alloy 6061. *Acta Materialia*, 2014, vol. 74, pp. 234–243.
14. Sriraman M.R., Babu S.S., Short M. Bonding characteristics during very high power ultrasonic additive manufacturing of copper. *Scripta Materialia*, 2010, vol. 62, no. 8, pp. 560–563.
15. Wolcott P.J., Sridharan N., Babu S.S., Miriyev A., Frage N., Dapino M.J. Characterisation of Al–Ti dissimilar material joints fabricated using ultrasonic additive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 114–123.
16. Li D., Soar R.C. Characterization of process for embedding SiC fibers in Al 6061 O matrix through ultrasonic consolidation. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 2009, vol. 131, no. 2, pp. 0210161–0210166. DOI: [10.1115/1.3030946](https://doi.org/10.1115/1.3030946).
17. Mariani E., Ghassemieh E. Microstructure evolution of 6061 O Al alloy during ultrasonic consolidation: An insight from electron backscatter diffraction. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 7, pp. 2492–2503. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.12.035](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.12.035).
18. Mirza F.A., Macwan A., Bhole S.D., Chen D.L. Microstructure and fatigue properties of ultrasonic spot welded joints of aluminum 5754 alloy. *JOM*, 2016, vol. 68, no. 5, pp. 1465–1475.
19. Sanga B., Wattal R., Nagesh D.S. Mechanism of Joint Formation and Characteristics of Interface in Ultrasonic welding: Literature Review. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 107–119. DOI: [10.21533/pen.v6i1.158.107](https://doi.org/10.21533/pen.v6i1.158.107).
20. Park D.S., Kim J.H., Seo J.S. Ultrasonic welding of Ni thin sheet. *International Journal of Mining, Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 168–172.
21. Nikolaev G.A. *Svarka v mashinostroenii: spravochnik* [Welding in machine engineering: reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 567 p.
22. Lee S.S., Kim T.H., Hu S.J., Cai W.W., Abell J.A., Li J. Characterization of joint quality in ultrasonic welding of battery tabs. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of The ASME*, 2013, vol. 135, no. 2, article number 012004. DOI: [10.1115/1.4023364](https://doi.org/10.1115/1.4023364).
23. Su Z., Zhu Z., Zhang Y., Zhang H., Xiao Q. Recrystallization behavior of a pure Cu connection interface with ultrasonic welding. *Metals*, 2021, vol. 11, pp. 1–17. DOI: [10.3390/met11010061](https://doi.org/10.3390/met11010061).
24. Lin J.-Y., Nambu S., Koseki T. Evolution of bonding interface during ultrasonic welding between Ni and steels with various microstructure. *ISIJ International*, 2020, vol. 60, no. 2, pp. 330–336.
25. Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Microstructure and properties of solid state joints of titanium sheets produced by ultrasonic welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 1008, no. 1, article number 012007. DOI: [10.1088/1757-899X/1008/1/012007](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1008/1/012007).
26. Patel V.K., Bhole S.D., Chen D.L. Influence of ultrasonic spot welding on microstructure in a magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 2011, vol. 65, no. 10, pp. 911–914.
27. Jiang Y., Chen Z., Zhan C., Chen T., Wang R., Liu Ch. Adiabatic shear localization in pure titanium deformed by dynamic loading: Microstructure and microtexture characteristic. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 640, pp. 436–442. DOI: [10.1016/j.msea.2015.06.028](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.028).
28. Ni Z.L., Ye F.X. Weldability and mechanical properties of ultrasonic welded aluminum to nickel joints. *Materials Letters*, 2016, vol. 185, pp. 204–207.

Microstructure and strength of joints of nickel sheets produced by ultrasonic welding

© 2021

Elvina R. Shayakhmetova^{*1}, postgraduate student, research assistant

*Maria A. Murzinova*², PhD (Engineering), Associate Professor, senior researcher

*Airat A. Nazarov*³, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Deputy Director for Science

Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, Ufa (Russia)

*E-mail: elvina1408@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1659-9922>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4418-3529>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7241-9386>

Abstract: Ultrasonic welding (USW) is one of the methods for producing solid-phase joints of thin metal sheets, which in the future can be used to obtain laminated composite materials, for additive manufacturing and renovation of metallic articles. The quality of joints depends on both the processing conditions and the properties of welded metals and alloys. At present, the USW conditions, the properties, and structure of weld joints of strong metals, in particular, of nickel, are underexplored. In this work, the authors studied the influence of the compressive load magnitude on the lap shear strength and the structure of joints of annealed nickel sheets with a thickness of 0.5 mm produced by spot USW. The authors carried out USW at a vibration frequency of 20 kHz with an amplitude of 15 μm , the time of welding was equal to 2 s. The compressive load magnitude was varied from 3.5 to 7 kN. The study showed that with an increase in the compressive load in the considered range of values, the strength of weld joints increased, reached a maximum, and then decreased. The joints obtained at the compressive load of 6 kN demonstrated the highest lap shear strength of 1950 N. A zone of thermomechanical influence with a gradient microstructure is observed near the contact of the welded surfaces. In a layer with a thickness of 10–20 μm , the initial coarse-grained structure of nickel is transformed into an ultra-fine-grained one with a grain size of less than 1 μm . The ultra-fine-grained layer neighbors on crystallites, the size of which is several micrometers and increases with a distance from the contact surface of welded sheets. The authors compared the results of mechanical lap shear tests and structural studies with the data obtained after ultrasonic welding of nickel, aluminum, and copper alloys.

Keywords: ultrasonic welding; nickel; ultra-fine-grained structure.

Acknowledgments: The work is carried out within the governmental assignment of the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences. The microstructure studies and mechanical tests were performed on the base of Collaborative Access Center “Structural and Physico-Mechanical Research of Materials” of the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

For citation: Shayakhmetova E.R., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Microstructure and strength of joints of nickel sheets produced by ultrasonic welding. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 2, pp. 75–81. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-75-81.