

Прочность соединений пластин меди, полученных точечной ультразвуковой сваркой инструментом с разной высотой зубцов

Шаяхметова Эльвина Рафитовна, младший научный сотрудник
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа (Россия)

E-mail: elvinar@imsp.ru

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

Поступила в редакцию 30.06.2025

Пересмотрена 21.07.2025

Принята к публикации 12.08.2025

Аннотация: Ультразвуковая сварка (УЗС) металлов позволяет получать твердофазные соединения между тонкими заготовками и относится к энергоэффективным экологически чистым технологиям. Широкое использование этой технологии сдерживает невысокая прочность получаемых соединений и нестабильность их свойств. Одним из способов повышения прочностных характеристик является разработка сварочного инструмента, обеспечивающего стабильную передачу энергии ультразвуковых колебаний в зону соединения. Для этого на поверхность сварочного наконечника и наковальни наносят рельеф с зубцами или пирамидками разной формы и высоты. В работе представлены данные об усилиях и работе разрушения нахлесточных соединений, полученных точечной ультразвуковой сваркой пластин меди инструментом с высотой зубцов 0,1 и 0,4 мм. УЗС проводили с частотой 20 кГц и амплитудой колебаний 18–20 мкм, длительность сварки составляла 2 и 3 с, величина сжимающей нагрузки 2,5 кН. В работе рассмотрены особенности разрушения полученных соединений и распределения нормальных деформаций в сварной точке, рассчитаны коэффициенты интенсивности напряжений в ее окрестностях. Показано, что после УЗС в течение 3 с показатели прочности соединений, полученных разным инструментом, достигают наибольших значений, они близки по величине, однако разброс экспериментальных данных вдвое меньше после сварки инструментом с мелкими зубцами. Соединения, полученные таким инструментом, разрушаются по поверхности соединения, а после сварки инструментом с крупными зубцами – с отрывом сварной точки, что объясняется увеличением коэффициента интенсивности напряжений в вершине концентратора, окружающего сварную точку.

Ключевые слова: медь; ультразвуковая сварка металлов; твердофазное соединение; прочность соединений; рельеф сварочного инструмента; коэффициент интенсивности напряжений.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания ИПСМ РАН (регистрационный номер 124022900006-2). Часть экспериментальных данных получена при выполнении гранта РФФИ № 22-19-00617 (<https://rscf.ru/project/22-19-00617/>). Микроструктурные исследования проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Автор выражает глубокую благодарность к.т.н. М.А. Мурзиновой и д.ф.-м.н. А.А. Назарову за помощь при проведении исследований и обсуждение полученных результатов.

Статья подготовлена по материалам докладов участников XII Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2025), Тольятти, 15–19 сентября 2025 года.

Для цитирования: Шаяхметова Э.Р. Прочность соединений пластин меди, полученных точечной ультразвуковой сваркой инструментом с разной высотой зубцов // *Frontier Materials & Technologies*. 2025. № 3. С. 125–136. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-3-73-10.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая сварка (УЗС) металлов относится к энергоэффективным экологически чистым технологиям, которые применяются преимущественно для получения электрических контактов в автомобильной и электротехнической промышленности [1]. В настоящее время методом УЗС получают соединения металлических заготовок из листов, лент, фольг, проволоки сечением до 3 мм.

Несмотря на ряд преимуществ, широкое использование УЗС металлов ограничено из-за невысокой прочности полученных соединений и широкого разброса (нестабильности) результатов механических испытаний [2; 3]. Это во многом связано с малой величиной и неравномерным распределением по площади сварной точки деформаций, которые необходи-

мы для образования и увеличения площади очагов схватывания [4; 5].

Распределение и величина деформации зависят от температуры в зоне соединения, толщины свариваемых заготовок, их теплофизических и механических свойств и режимов УЗС, прежде всего подводимой энергии, пропорциональной времени воздействия ультразвука, и сжимающего давления [6–8]. При выбранном давлении на начальных этапах УЗС верхняя пластина должна скользить по нижней, обеспечивая удаление оксидных пленок и загрязнений с контактирующих поверхностей, а также их разогрев за счет трения. На конечных этапах процесса это же давление должно быть достаточным для залечивания несплошностей в зоне соединения металлов, разогретых до 0,4–0,8 Тпл [1; 3].

Для передачи энергии ультразвуковых колебаний от волновода в зону соединения на поверхность сварочного наконечника и наковальни наносят насечки разной формы и глубины [1; 9–11]. На поверхности инструмента создается рельеф, образованный пирамидками или зубцами, высота и периодичность расположения которых составляет доли миллиметра. Внедрение зубцов/пирамидок в соединяемые заготовки обеспечивает их контакт с инструментом, но сопровождается экструзией (выдавливанием) металла во впадины на поверхности инструмента. В результате распределение деформаций в области сварной точки становится периодическим [1; 5; 11].

В работе [5] была установлена однозначная корреляция между распределением нормальных деформаций в центральном сечении сварной точки и линейной плотностью соединений. В описанных экспериментах удовлетворительную плотность, составляющую не менее 70 %, наблюдали в тех областях, где образец подвергался сжатию на 15 % и более. При этом в соседних областях, где металл выдавливался во впадины инструмента, были зафиксированы растягивающие деформации, и линейная плотность соединений уменьшалась до 5 %. Достаточные для заживления дефектов сжимающие деформации могут достигаться после того, как зубцы инструмента полностью внедрятся в поверхность соединяемых пластин и впадины полностью заполнятся металлом [4], что может приводить к росту прочности соединений. Можно ожидать, что с уменьшением высоты зубцов их внедрение в поверхность пластин будет происходить быстрее, и при прочих равных условиях УЗС образец в сварной точке будет испытывать сжимающие деформации, достаточные для образования сварных соединений высокой прочности.

Цель работы – проанализировать причины изменений усилий и типа разрушения нахлесточных соединений меди, полученных точечной ультразвуковой сваркой инструментом с разной высотой зубцов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения экспериментов использовали пластины меди размером 50×20 мм², вырезанные из листов толщиной 0,8 мм, производства ООО «Дегтярский металлургический завод», г. Екатеринбург (Россия). Химический состав листов, указанный в сертификате производителя, представлен в таблице 1.

Перед сваркой пластины шлифовали на абразивной бумаге зернистостью Р240 под углом 45° к длинной стороне пластины и обезжиривали спиртом и ацетоном. Такая подготовка позволяет надежно отличать следы скольжения, возникающие во время УЗС, и царапины, появляющиеся во время механических испытаний на поверхностях разрушения, от следов предварительной обработки поверхностей пластин.

УЗС проводили на лабораторной установке, изготовленной в ИПСМ РАН (Россия) и успешно использованной при сварке пластин титана [12], никеля [13] и меди [14]. Использовали сварочные наконечники с одинаковыми размерами площадок, 6×6 мм², и рельефом в виде зубцов разной высоты: $H=0,4$ мм и $H=0,1$ мм (рис. 1). Рельеф наковальни соответствовал рельефу наконечника. Далее в тексте инструмент с высотой зубцов $H=0,1$ мм назван инструментом «с мелкими зубцами» или «тонким», а инструмент с высотой зубцов $H=0,4$ мм – инструментом «с крупными зубцами» или «грубым».

УЗС выполняли с частотой 20 кГц и амплитудой колебаний волновода 18–20 мкм. Колебания волновода были

Таблица 1. Химический состав исследованного материала по ГОСТ 859-2014, мас. %
Table 1. Chemical composition of the investigated material according to GOST 859-2014, wt. %

Cu	O	Zn	Fe	Pb	S	Ni	Другие
99,96	0,02	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	<0,03

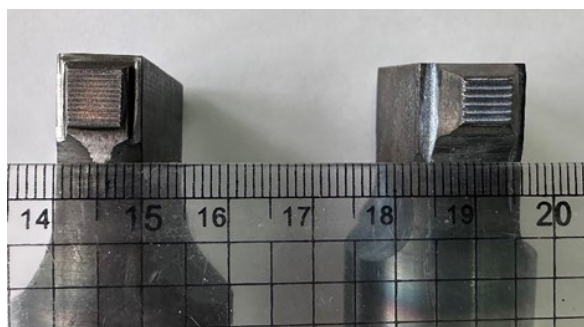


Рис. 1. Фотография сварочных наконечников, использованных при УЗС:
слева – наконечник с зубцами $H=0,1$ мм, справа – с зубцами $H=0,4$ мм

Fig. 1. Photograph of welding tips used in ultrasonic welding:
on the left – a tip with teeth of $H=0.1$ mm, on the right – with teeth of $H=0.4$ mm

параллельны короткой стороне пластин. Усилие сжатия составляло 2,5 кН, время воздействия ультразвука – 2 и 3 с.

Прочностные свойства соединений оценивали по результатам испытаний на сдвиг растяжением в соответствии с рекомендациями ГОСТ 6996-66. Испытания проводили на универсальной испытательной машине Instron 5982 (Англия) при комнатной температуре со скоростью движения траверсы испытательной машины 1 мм/мин. В ходе испытаний фиксировали величину перемещения траверсы (l , мм) и соответствующее усилие нагружения (F , Н). Максимальное (пиковое) значение $F=F_{\max}$ считали усилием разрушения образца. Площадь под кривой $F(l)$, ограниченную значением $F_{\max}$, принимали за работу разрушения сварных соединений (A , Дж). Средние значения усилий ($\bar{F}_{\max}$) и работы разрушения ($\bar{A}$) сварных соединений, полученных УЗС разным инструментом по каждому режиму, получали по результатам испытаний не менее 4 образцов. За величину статистической погрешности принимали стандартное отклонение.

Поверхности разрушения испытанных образцов исследовали на растровом электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMH FEG (Чехия) в режиме вторичных электронов при увеличениях от $\times 20$ до $\times 2000$.

Глубину внедрения зубцов наконечника измеряли на инструментальном микроскопе в центральном сечении сварной точки, параллельном направлению вибрации наконечника. При выполнении измерений фиксировали координаты центра отпечатка каждого зубца и впадины наконечника (x_i ; y_i), а также толщину сваренного образца в этой точке (h_i). Величину нормальной деформации образца (e_{ni} , %) в каждой точке рассчитывали как $e_{ni}=100 \times (h_i - h_0)/h_0$, где h_0 – толщина двух исходных пластин. По результатам расчета строили распределения нормальных деформаций и глубины внедрения зубцов инструмента в центральном сечении сварного образца. Методика этих измерений и построения распределений нормальных деформаций образца подробно описана и проиллюстрирована в работе [5]. Дополнительно глубину внедрения зубцов измеряли в периферийных сече-

ниях сварных точек, а также по отпечаткам наконечников на сваренных образцах, фиксируя изменение фокусного расстояния при наведении резкости на поверхность пластины и дно отпечатка каждого зубца. Выполненные измерения показали, что глубина внедрения зубцов уменьшается одинаково в параллельном и перпендикулярном колебанию наконечника направлениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Механические испытания

Изменение высоты зубцов инструмента не оказывает значимого влияния на усилия и работу разрушения соединений, полученных при одинаковых условиях УЗС (таблица 2). Однако разброс экспериментальных значений $\bar{F}_{\max}$ и $\bar{A}$ вдвое больше после сварки грубым инструментом. Все образцы, полученные УЗС в течение 2 с, разрушались по поверхности соединения (рис. 2 а). Увеличение времени сварки с 2 до 3 с не приводило к изменению типа (моды) разрушения образцов, полученных инструментом с мелкими зубцами, но вызывало прирост значений $\bar{F}_{\max}$ и $\bar{A}$ (таблица 2).

Увеличение времени сварки инструментом с крупными зубцами, напротив, не повлияло на $\bar{F}_{\max}$ и $\bar{A}$ соединений, однако привело к изменению моды их разрушения, которое происходило с частичным отрывом сварной точки (рис. 2 б, с). Трещина зарождалась на стороне сварной точки, перпендикулярной направлению действия растягивающей силы, и распространялась вдоль этой стороны. Дальнейшее разрушение образцов происходило разными путями. В одних случаях трещина выходила за пределы сварной точки и росла в пластине, раскрываясь под действием растягивающей нагрузки (рис. 2 б). При этом свободные края пластин изгибались вокруг сварной точки. В других случаях трещина продолжала распространение по сторонам точки, параллельным растягивающей силе. Однако смыкания трещин, растущих навстречу друг другу, не наблюдалось. Ему предшествовал изгиб

Таблица 2. Свойства соединений пластин меди, полученных УЗС инструментом с разной высотой зубцов
Table 2. Properties of joints of copper plates produced by ultrasonic welding with a tool with different tooth heights

Свойства соединений	Высота зубцов (H); время УЗС (t)			
	$H=0,1$ мм; $t=2$ с	$H=0,1$ мм; $t=3$ с	$H=0,4$ мм; $t=2$ с	$H=0,4$ мм; $t=3$ с
$\bar{F}_{\max}$, Н	1593±101	2075±100	1814±294	1918±241
k_F , %	6	5	16	12
$\bar{A}$, Дж	0,46±0,18	1,76±0,61	0,99±0,64	1,91±1,06
k_A , %	39	34	64	66
Мода разрушения	По поверхности соединения			С отрывом точки

Примечание. $\bar{F}_{\max}$ – средние значения усилий разрушения; k_F – коэффициент вариации экспериментальных значений $\bar{F}_{\max}$; $\bar{A}$ – средние значения работы разрушения; k_A – коэффициент вариации экспериментальных значений $\bar{A}$.

Note. $\bar{F}_{\max}$ is average values of fracture load; k_F is a coefficient of variation of experimental $\bar{F}_{\max}$ values; $\bar{A}$ is average values of fracture energy; k_A is a coefficient of variation of experimental $\bar{A}$ values.

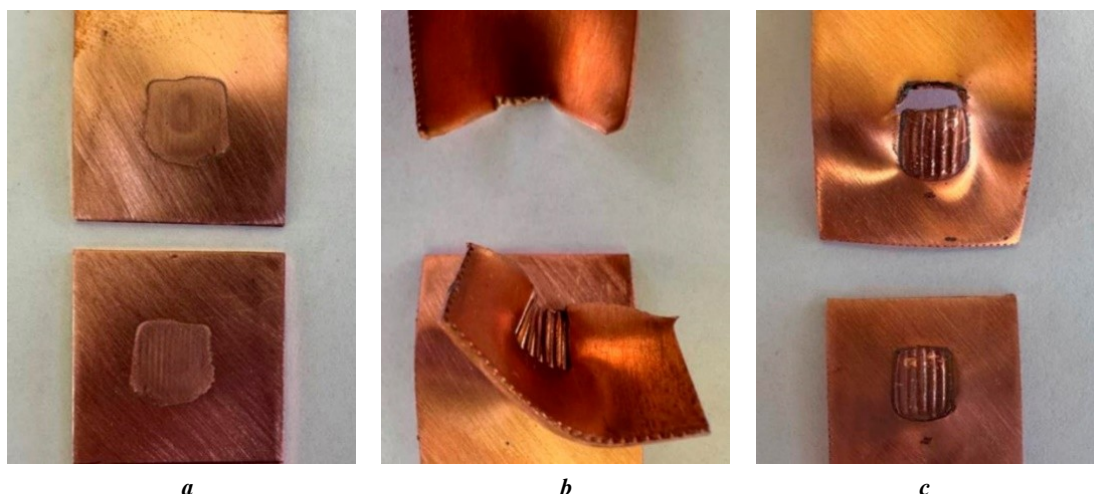


Рис. 2. Фотографии образцов после испытаний:

a – разрушение по поверхности соединения; *b*, *c* – разрушение с частичным отрывом сварной точки

Fig. 2. Photographs of samples after testing:

a – interfacial fracture; *b*, *c* – partial nugget pull-out fracture

свободных краев пластин и разрушение по поверхности соединения (рис. 2 с).

Фрактографический анализ

Во всех случаях поверхность разрушения имела шиферный (волнистый) макрорельеф, созданный зубцами сварочного инструмента (рис. 3 а, с и 4 а, с). Особенности микрорельефа под отпечатками зубцов и между ними зависели от времени УЗС и от высоты зубцов.

На поверхностях разрушения образцов, сваренных инструментом с мелкими зубцами ($H=0,1$ мм) в течение 2 с, наблюдается однородный микрорельеф, высота неровностей которого соизмерима с глубиной рисок от предварительной шлифовки (рис. 3 б). Как под отпечатками зубцов, так и между ними наблюдаются мелкие ямки, слабо вытянутые по направлению вибрации наконечника. На поверхностях разрушения этих образцов не наблюдается ни очагов схватывания с развитым ямочным микрорельефом, ни участков со сглаженными вершинами рисок от предварительной шлифовки, что свидетельствует о плотном контакте пластин во время УЗС. После сварки этим же инструментом в течение 3 с под отпечатками всех зубцов присутствуют очаги схватывания, состоящие из множества ямок, вытянутых в направлении сдвига (рис. 3 д).

Микрорельеф на поверхностях разрушения образцов, полученных инструментом с высотой зубцов $H=0,4$ мм, весьма неоднороден. После сварки в течение 2 с под отпечатками зубцов наблюдаются многочисленные очаги схватывания, тогда как между ними – следы предварительной шлифовки (рис. 4 б).

В этих участках вершины рисок от предварительной шлифовки смяты (сглажены), и участки с мелкими ямками почти нет. Увеличение времени УЗС до 3 с приводит к существенному расширению областей, занятых очагами схватывания, и к появлению микрорельефа с мелкими ямками между отпечатками зубцов в областях, где сохраняются следы предварительной шлифовки (рис. 4 д).

Результаты измерения нормальных деформаций

Отмеченные особенности расположения очагов схватывания на поверхностях разрушения связаны с разным распределением деформаций в сварных точках, которые, в свою очередь, во многом зависят от внедрения зубцов инструмента в соединяемые пластины. Зубцы наконечника высотой $H=0,1$ мм внедрялись в привариваемую пластину сравнительно равномерно по всей площади сварной точки на глубину 0,07–0,08 мм после УЗС в течение 2 с (рис. 5 а). После УЗС в течение 3 с высота рельефа на поверхности пластины достигала 0,1 мм, а размер сварной точки – размера площадки сварочного наконечника (рис. 5 а, с). Вдоль всего сечения сварной точки наблюдались деформации сжатия, величина которых достигала 12 % под отпечатками зубцов и уменьшалась до 3 % под впадинами наконечника (рис. 5 б, синяя линия). Видно, что нормальные деформации образца изменялись по периодическому закону. Величина периода однозначно определяется расстоянием между вершинами зубцов инструмента и составляет 0,6 мм для инструмента с $H=0,1$ мм.

Глубина внедрения зубцов грубого наконечника ($H=0,4$ мм) была заметно больше в центре сварной точки и уменьшалась к ее периферии (рис. 5 а, d, e). После УЗС в течение 2 и 3 с наибольшая глубина внедрения в центре сварной точки составляла 0,25 и 0,37 мм соответственно, а наименьшая на периферии точки – 0,17 и 0,28 мм. Поскольку зубцы наконечника не внедрялись полностью в поверхность пластины, размер сварной точки оставался меньше размера площадки сварочного наконечника. Период изменения нормальных деформаций образцов, сваренных инструментом с высотой зубцов $H=0,4$ мм, составлял 0,9 мм, что соответствует расстоянию между вершинами зубцов инструмента. При этом периодически изменяющиеся деформации сжатия величиной 7–14 % по всему сечению сварной точки (рис. 5 б, красная сплошная линия) наблюдались, если зубцы наконечника располагались над впадинами наконечника, как показано на рис. 5 d. При любом другом взаимном расположении зубцов и впадин инструмента (рис. 5 е) сжимающие деформации сменялись растяги-

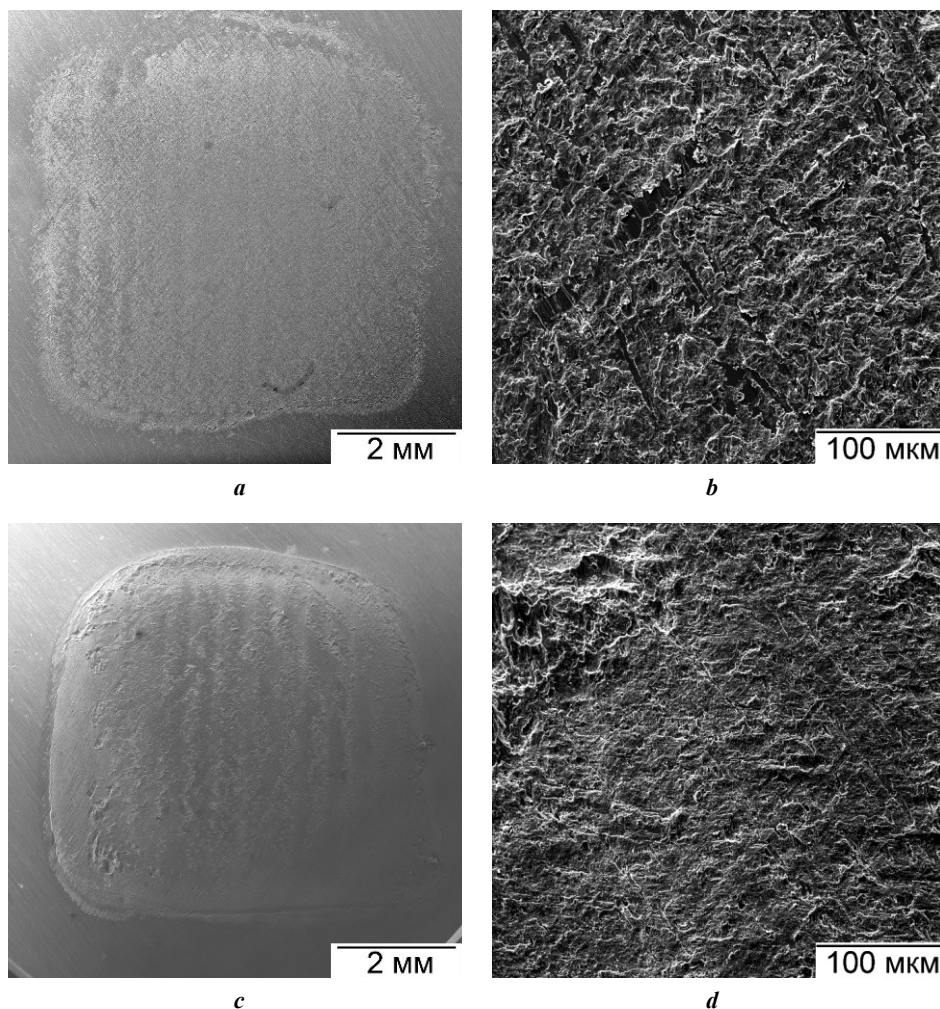


Рис. 3. Типичные изображения поверхностей разрушения образцов, полученных УЗС инструментом с высотой зубцов $H=0,1$ мм:

a, b – время воздействия ультразвука 2 с; *c, d* – время воздействия ультразвука 3 с;
a, c – макро рельеф; *b, d* – микро рельеф

Fig. 3. Typical images of fracture surfaces of samples produced by ultrasonic welding with a tool with a tooth height of $H=0.1$ mm:

a, b – welding time of 2 s; *c, d* – welding time of 3 s; *a, c* – macrorelief; *b, d* – microrelief

вающими (красная пунктирная линия на рис. 5 б). В отсутствие контроля за взаимным расположением зубцов инструмента высотой 0,4 мм распределение деформаций в образцах, полученных при одних и тех же условиях сварки, существенно различалось, что вызвало значительный разброс усилий разрушения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Испытания на сдвиг растяжением являются наиболее простым и потому наиболее распространенным методом оценки качества точечных сварных соединений. Величина $\bar{F}_{\max}$ характеризует несущую способность сварных образцов, а величина $\bar{A}$ – их способность сопротивляться упругим и пластическим деформациям [1]. В то же время вопрос о достаточности этих данных для оценки работоспособности соединений и о возможности сравнения прочностных характеристик остается дискуссионным.

Из полученных данных следует, что при выбранных режимах УЗС использование сварочного инструмента

с высотой зубцов 0,1 и 0,4 мм позволяет получать соединения пластин меди толщиной 0,8 мм, которые демонстрируют одинаковые (в пределах статистической погрешности) усилия и работу разрушения. При этом величина разброса экспериментальных данных вдвое меньше после сварки инструментом с зубцами высотой 0,1 мм.

Во время УЗС зубцы высотой $H=0,1$ мм полностью внедряются в соединяемые пластины, что обеспечивает 1) возникновение в сварной точке нормальных сжимающих деформаций; 2) равенство размеров сварной точки размерам площадки сварочного наконечника; 3) уменьшение толщины пластин на периферии сварной точки не более чем на 0,1 мм.

При неконтролируемом взаимном расположении зубцов наконечника и наковальни высотой $H=0,4$ мм их неполное/частичное внедрение в пластину вызывали 1) возникновение в сварной точке как сжимающих, так и растягивающих нормальных деформаций, что согласуется с результатами работы [5]; 2) образование сварной точки, размер которой меньше размера наконечника;

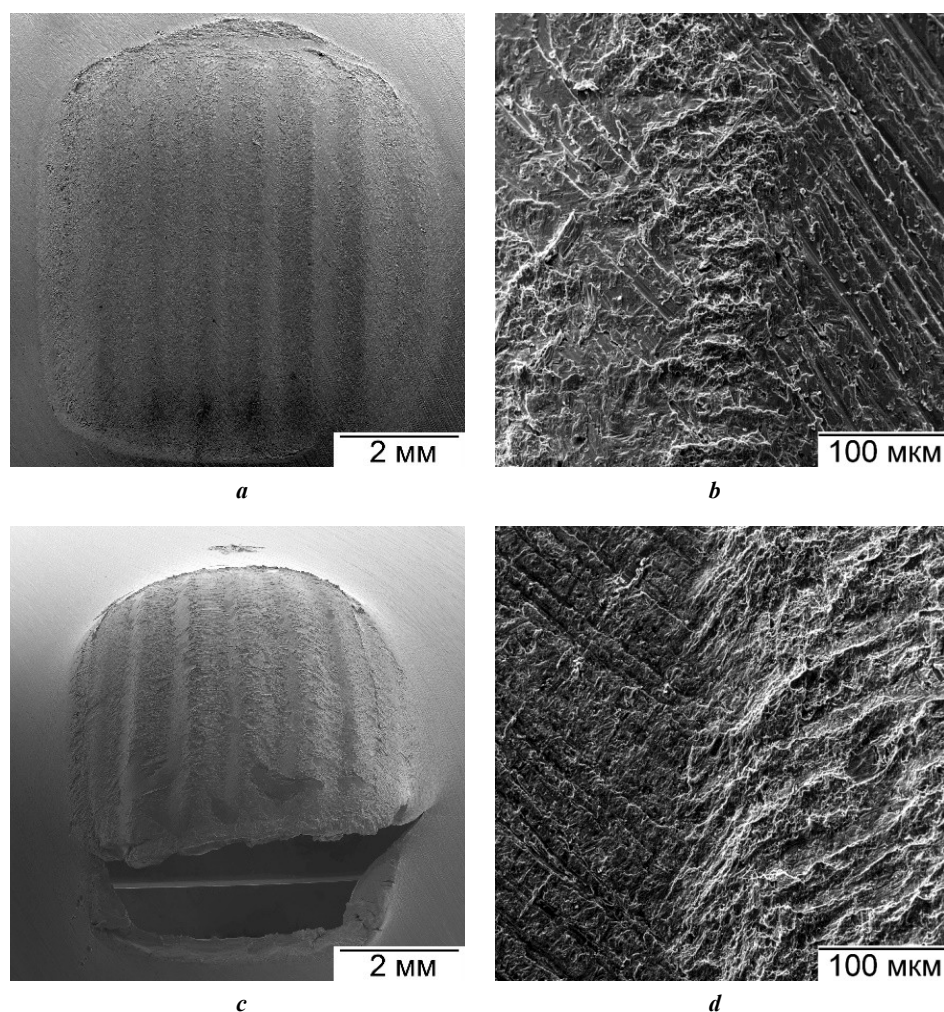


Рис. 4. Типичные изображения поверхностей разрушения образцов, полученных УЗС инструментом с высотой зубцов $H=0,4$ мм:

a, b – время воздействия ультразвука 2 с; *c, d* – время воздействия ультразвука 3 с;
a, c – макрорельеф; *b, d* – микрорельеф

Fig. 4. Typical images of fracture surfaces of samples produced by ultrasonic welding with a tool with a tooth height of $H=0.4$ mm:

a, b – welding time of 2 s; *c, d* – welding time of 3 s; *a, c* – macror relief; *b, d* – microrelief

3) уменьшение толщины пластин на периферии сварной точки на 0,17–0,28 мм.

Из-за разницы размеров сварных точек (рис. 5) сравнение величин $\bar{F}_{\max}$ (таблица 2) становится не вполне корректным. Результаты оценки прочности сварного соединения σ как отношения $\bar{F}_{\max}$ к площади сварной точки S , измеренной по отпечаткам зубцов (рис. 5 а), показали, что σ несколько выше после УЗС грубым инструментом (таблица 3). Однако эти результаты трудно трактовать однозначно, поскольку при испытаниях на сдвиг растяжением сварная точка находится в сложном напряженно-деформированном состоянии [15–17]. Под действием растягивающей силы F в плоскости соединения возникают напряжения сдвига, которые уравниваются двумя изгибающими моментами. При этом на противоположных краях (краях) сварной точки, перпендикулярных направлению растяжения, возникают максимальные растягивающие и сжимающие напряжения, как показано на рис. 6. Кроме того, между сваренными внахлест пластинами всегда остается узкая щель – острый концентратор

(рис. 5 d, e), расположенный вдоль периметра сварной точки. Влияние концентратора на свойства сварных соединений пытаются учесть, например, оценивая величину критического эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений. Результаты такой оценки важны при прогнозировании работоспособности точечных сварных соединений и конструкций под действием циклических знакопеременных нагрузок и позволяя частично заменить трудоемкие испытания [15; 16]. Однако общепринятой методики таких оценок не предложено, используются разные подходы [18].

В работе [15] были предложены простые уравнения для расчета критического эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений K_{eq} в вершине острого концентратора точечных сварных соединений, полученных контактной точечной сваркой:

$$K_{eq} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} = \frac{\sqrt{19} F_{\max}}{2\pi d \sqrt{h}},$$

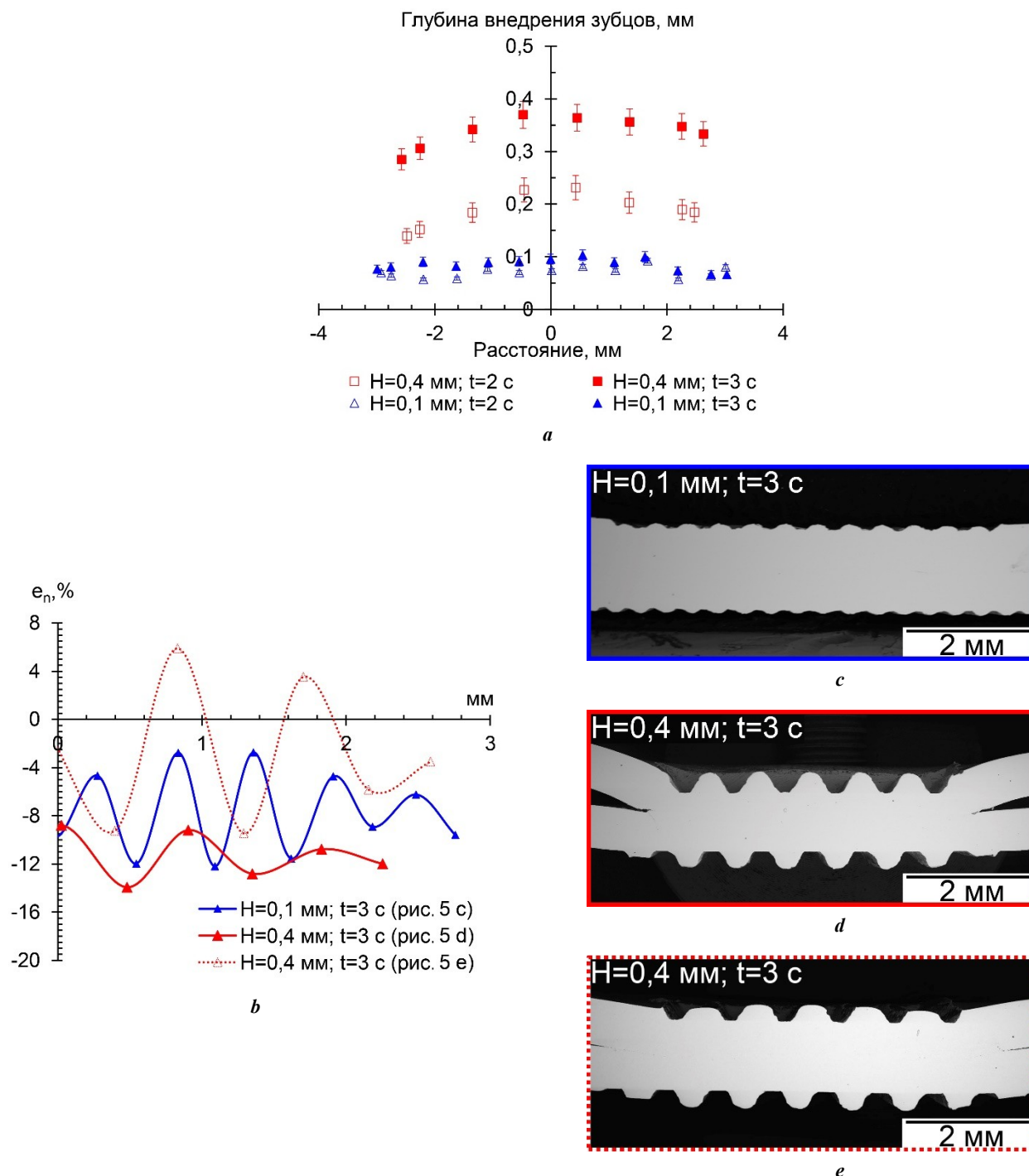


Рис. 5. Влияние высоты зубцов сварочного инструмента на деформацию в сварной точке:

а – глубина внедрения наконечника в соединяемые пластины;

б – распределение нормальных деформаций образцов вдоль линий соединений.

Поперечные сечения образцов, полученных УЗС инструментом с высотой зубцов: **с** – H=0,1 мм; **д, е** – H=0,4 мм

Fig. 5. Influence of the height of the welding tool teeth on the deformation at the weld spot:

а – depth of teeth penetration into the plates being joined;

б – distribution of normal deformations of the samples along the joint lines.

Cross-sections of samples produced by the ultrasonic welding

using the tool with the height of the teeth: **с** – H=0.1 mm; **д, е** – H=0.4 mm

где K_I и K_{II} – коэффициенты интенсивности напряжений
вблизи вершин трещины отрыва и поперечного сдвига
соответственно;
 K_{eq} – критический эквивалентный коэффициент интенсив-
ности напряжений при испытаниях на сдвиг растяжением;

F_{max} – максимальные усилия нагружения при таких ис-
пытаниях;

d – диаметр сварной точки;

h – толщина пластин.



Рис. 6. Сварной образец в клиновых захватах машины во время испытаний на сдвиг растяжением.

Схема распределения максимальных напряжений вблизи сварной точки по данным [15]

Fig. 6. Welded sample in wedge grips of the testing machine during tensile lap shear tests.

Scheme of maximum stress distributions near the welded spot according to [15]

Таблица 3. Исходные данные и результаты оценки критического эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений и прочности соединений

Table 3. Initial data and results of the assessment of the critical equivalent stress intensity factor and strength of joints

Характеристики соединений	Высота зубцов (H); время УЗС (t)			
	$H=0,1$ мм; $t=2$ с	$H=0,1$ мм; $t=3$ с	$H=0,4$ мм; $t=2$ с	$H=0,4$ мм; $t=3$ с
S , мм ²	35,21	35,99	24,53	27,03
h , мм	0,71	0,69	0,62	0,49
$\bar{F}_{\max}$, Н	1593	2075	1814	1918
K_{eq} , МПа $\sqrt{м}$	6,2	8,1	9,1	10,3
σ , МПа	45	58	74	71

Примечание. S , мм² – площадь сварной точки; h , мм – толщина пластин по периметру сварной точки; $\bar{F}_{\max}$ – средние значения усилий разрушения; K_{eq} – эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений; σ – прочность сварного соединения.

Note. S , mm² is a weld spot area; h , mm is the thickness of plates around the weld spot perimeter; $\bar{F}_{\max}$ is average values of fracture load; K_{eq} is an equivalent stress intensity factor; σ is the strength of welded joint.

Этот подход был успешно использован для расчета коэффициентов интенсивности напряжений, возникающих при испытаниях соединений, полученных точечной сваркой трением с перемешиванием [19; 20] и УЗС [18; 21–24]. В последнем случае d^* – эквивалентный диаметр круга, площадь которого равна площади сварной точки, оставленной прямоугольным сварочным наконечником. Очевидно, что $d^* = \sqrt{4S/\pi}$, где S – площадь сварной точки. При выполнении оценок авторы работ [21–24] не учитывали влияние условий УЗС на размеры сварной точки и изменение толщины

пластин, принимая площадь точки S равной площади сварочного наконечника, а толщину пластин сваренного образца h – равной толщине исходного листа.

В отличие от [21–24], в данной работе K_{eq} рассчитывали с учетом изменений S и h , которые обусловлены использованием инструмента с разной высотой зубцов и разной продолжительностью УЗС (таблица 3). Такой подход позволил показать, что увеличение времени сварки инструментом с мелкими и крупными зубцами приводит к росту значений K_{eq} приблизительно на 30 и 13 % соответственно. В первом случае прирост K_{eq} связан с приростом $\bar{F}_{\max}$, а во втором – с уменьшением раз-

мера сварной точки S и толщины пластин h по ее краям. Уменьшение этих геометрических размеров образцов сопровождается быстрым снижением усталостной долговечности [18], несмотря на рост критических напряжений в окрестностях вершины трещины, вызывающих ее быстрое распространение. Уменьшение h также приводит к изменению моды разрушения образцов, которое развивается не по поверхности соединения (рис. 2 а), а с отрывом сварной точки (рис. 2 б, в), и трещина зарождается и растет в области действия максимальных растягивающих напряжений (рис. 6).

Часто полагают [4; 17], что разрушение с отрывом сварной точки типично для соединений высокого качества, поскольку сопротивление приложенной нагрузке сварного соединения выше, чем сечения пластины по его краю. Однако и в этом случае очаги схватывания с развитым ячеистым рельефом не покрывают всю поверхность разрушения и расположены преимущественно под отпечатками зубцов (рис. 4 в). Следовательно, качество соединений может быть улучшено путем оптимизации режимов УЗС и совершенствования рельефа инструмента. Например, некоторый прирост $\bar{F}_{\max}$, $\bar{A}$ и K_{eq} может наблюдаться после увеличения сжимающего усилия и/или продолжительности УЗС при сварке инструментом с мелкими зубцами. Однако это неизбежно приведет к его ускоренному износу. Подобные меры при сварке инструментом с крупными зубцами нецелесообразны, поскольку вызовут утонение пластин по периметру точки. Поэтому совершенствование рельефа сварочного инструмента с учетом высоты насечек и толщины соединяемых пластин представляется перспективным направлением для дальнейших исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты сравнительного исследования соединений пластин меди толщиной 0,8 мм, полученных ультразвуковой сваркой с частотой 20 кГц и амплитудой колебаний 18–20 мкм в течение 2 и 3 с под действием сжимающего усилия 2,5 кН инструментом с высотой зубцов 0,1 и 0,4 мм, показали, что увеличение времени УЗС до 3 с приводит к росту усилий и работы разрушения полученных соединений. Высота зубцов инструмента не оказала значимого влияния на средние значения этих величин, при этом коэффициент вариации экспериментальных значений был вдвое меньше, если УЗС выполняли инструментом с мелкими зубцами. Следовательно, для повышения стабильности свойств сварных соединений целесообразно использовать сварочный инструмент с высотой зубцов 0,1 мм. После УЗС этим инструментом площадь сварной точки больше, а утонение пластин меньше, чем после использования инструмента с зубцами высотой 0,4 мм. Это может увеличить усталостную долговечность, несмотря на меньшие значения прочности и критического коэффициента интенсивности напряжений. Однако при выбранных условиях УЗС ее возможности реализованы не полностью. Для повышения свойств соединений и их стабильности необходимы работы по дальнейшей оптимизации рельефа инструмента и режимов УЗС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- De Leon M., Shin H.S. Review of the advancements in aluminum and copper ultrasonic welding in electric vehicles and superconductor applications // *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. Vol. 307. Article number 117691. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2022.117691](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117691).
- Müller F.W., Mirz C., Schiebahn A., Reisgen U. Influence of quality features, disturbances, sensor data, and measurement time on quality prediction for ultrasonic metal welding // *Welding in the World*. 2025. Vol. 69. P. 1961–1989. DOI: [10.1007/s40194-025-01959-x](https://doi.org/10.1007/s40194-025-01959-x).
- Yang Jingwei, Xie Chuhao, Zhang Jie, Qiao Jian. Design strategies for enhancing strength and toughness in ultrasonic welding of dissimilar metals: A review // *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 42. Article number 111502. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2025.111502](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111502).
- Yang Jingwei, Cao Diao, Lu Qinghua. The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints // *Materials*. 2017. Vol. 10. № 2. Article number 193. DOI: [10.3390/ma10020193](https://doi.org/10.3390/ma10020193).
- Murzinova M.A., Shayakhmetova E.R., Mukhametgalina A.A., Sarkeeva A.A., Nazarov A.A. Local plastic deformation and quality of Cu–Cu joints obtained by ultrasonic welding // *Metals*. 2023. Vol. 13. № 10. Article number 1661. DOI: [10.3390/met13101661](https://doi.org/10.3390/met13101661).
- Chen Kunkun, Zhang Yansong, Wang Hongze. Study of plastic deformation and interface friction process for ultrasonic welding // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2016. Vol. 22. № 3. P. 208–216. DOI: [10.1080/13621718.2016.1218601](https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1218601).
- Huang Hui, Chen Jian, Lim Yong Chae, Hu Xiaohua, Cheng Jiahao, Feng Zhili, Sun Xin. Heat generation and deformation in ultrasonic welding of magnesium alloy AZ31 // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 272. P. 125–136. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2019.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.016).
- Jedraśiak P., Shercliff H.R. Finite element analysis of heat generation in dissimilar alloy ultrasonic welding // *Materials & Design*. 2018. Vol. 158. P. 184–197. DOI: [10.1016/j.matdes.2018.07.041](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.041).
- Kim Jisun, Kim Jeawoong, Kim Inju. Analysis of welding properties using various horn-tip patterns in the ultrasonic metal welding process // *Mechanics & Industry*. 2020. Vol. 21. № 1. Article number 102. DOI: [10.1051/meca/2019078](https://doi.org/10.1051/meca/2019078).
- Du Pengfei, Chen Weishan, Deng Jie, Li Kai, Liu Yingxiang. Effects of knurl tooth angle on mechanical and thermal behaviors of aluminum ultrasonic welding // *Ultrasonics*. 2020. Vol. 108. Article number 106207. DOI: [10.1016/j.ultras.2020.106207](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106207).
- Ni Z.L., Li B.H., Liu Y., Huang L., Nazarov A., Wang X.X., Yuan Z.P., Ye F.X. Numerical analysis of ultrasonic spot welding of metal sheets: A review // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2023. Vol. 28. № 9. P. 841–864. DOI: [10.1080/13621718.2023.2260625](https://doi.org/10.1080/13621718.2023.2260625).
- Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Microstructure of a titanium sample produced by ultrasonic consolidation // *Letters on materials*. 2022. Vol. 12. № 2. P. 153–157. DOI: [10.22226/2410-3535-2022-2-153-157](https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-2-153-157).

13. Shayakhmetova E.R., Murzinova M.A., Mukhametgalina A.A., Nazarov A.A. Structure evolution in ultrafine-grained nickel induced by ultrasonic welding // *Letters on materials*. 2024. Vol. 14. № 1. P. 91–96. DOI: [10.48612/letters/2024-1-91-96](https://doi.org/10.48612/letters/2024-1-91-96).
14. Mukhametgalina A.A., Shayakhmetova E.R., Murzinova M.A., Nazarov A.A., Sarkeeva A.A. Effect of surface state on the quality of copper joints produced by ultrasonic welding // *Letters on materials*. 2024. Vol. 14. № 3. P. 190–197. DOI: [10.48612/letters/2024-3-190-197](https://doi.org/10.48612/letters/2024-3-190-197).
15. Zhang Shicheng. Stress intensities at spot welds // *International Journal of Fracture*. 1997. Vol. 88. P. 167–185. DOI: [10.1023/A:1007461430066](https://doi.org/10.1023/A:1007461430066).
16. Zhang Shicheng. Stress intensities derived from stresses around a spot weld // *International Journal of Fracture*. 1999. Vol. 99. P. 239–257. DOI: [10.1023/A:1018608615567](https://doi.org/10.1023/A:1018608615567).
17. Radakovic D.J., Tumuluru M. Predicting resistance spot weld failure modes in shear tension tests of advanced high-strength automotive steels // *Welding Journal*. 2008. Vol. 87. P. 96s–105s.
18. Patel V.K., Bhole S.D., Chen D.L. Fatigue life estimation of ultrasonic spot welded Mg alloy joints // *Materials & Design*. 2014. Vol. 62. P. 124–132. DOI: [10.1016/j.matdes.2014.05.008](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.008).
19. Rosendo T., Tier M., Mazzaferro J., Mazzaferro C., Strohaecker T.R., Dos Santos J.F. Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under lap shear tensile loading // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2015. Vol. 38. № 12. P. 1443–1455. DOI: [10.1111/ffe.12312](https://doi.org/10.1111/ffe.12312).
20. Zou Yangfan, Li Wenya, Yang Xiawei et al. Characterizations of dissimilar refill friction stir spot welding 2219 aluminum alloy joints of unequal thickness // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 79. P. 91–101. DOI: [10.1016/j.jmapro.2022.04.062](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.062).
21. Peng He, Chen Daolun, Jiang Xianguan. Microstructure and mechanical properties of an ultrasonic spot welded aluminum alloy: the effect of welding energy // *Materials*. 2017. Vol. 10. № 5. Article number 449. DOI: [10.3390/ma10050449](https://doi.org/10.3390/ma10050449).
22. Mohammed S.M.A.K., Dash S.S., Jiang Xianquan, Li Dongyang, Chen Daolun. Ultrasonic spot welding of 5182 aluminum alloy: evolution of microstructure and mechanical properties // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 56. P. 417–429. DOI: [10.1016/j.msea.2019.04.059](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.059).
23. Ma Qiuchen, Ma Jingyuan, Zhou Jianli, Ji Hongjun. Intrinsic dependence of welding quality and recrystallization on the surface-contacted micro-asperity scale during ultrasonic welding of Cu–Cu joints // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 17. P. 353–364. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.011).
24. Bajaj D., Mehavarnam R., Fang Xingfan, Ma Ninshu Xu, Li Dongyang, Chen Daolun. Achieving superior aluminum-steel dissimilar joining via ultrasonic spot welding: microstructure and fracture behavior // *Materials Science and Engineering: A*. 2025. Vol. 919. Article number 147489. DOI: [10.1016/j.msea.2024.147489](https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147489).

REFERENCES

1. De Leon M., Shin H.S. Review of the advancements in aluminum and copper ultrasonic welding in electric vehicles and superconductor applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, vol. 307, article number 117691. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2022.117691](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117691).
2. Müller F.W., Mirz C., Schiebahn A., Reisgen U. Influence of quality features, disturbances, sensor data, and measurement time on quality prediction for ultrasonic metal welding. *Welding in the World*, 2025, vol. 69, pp. 1961–1989. DOI: [10.1007/s40194-025-01959-x](https://doi.org/10.1007/s40194-025-01959-x).
3. Yang Jingwei, Xie Chuhaio, Zhang Jie, Qiao Jian. Design strategies for enhancing strength and toughness in ultrasonic welding of dissimilar metals: A review. *Materials Today Communications*, 2025, vol. 42, article number 111502. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2025.111502](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111502).
4. Yang Jingwei, Cao Diao, Lu Qinghua. 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. DOI: [10.3390/ma10020193](https://doi.org/10.3390/ma10020193).
5. Murzinova M.A., Shayakhmetova E.R., Mukhametgalina A.A., Sarkeeva A.A., Nazarov A.A. Local plastic deformation and quality of Cu–Cu joints obtained by ultrasonic welding. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 10, article number 1661. DOI: [10.3390/met13101661](https://doi.org/10.3390/met13101661).
6. Chen Kunkun, Zhang Yansong, Wang Hongze. Study of plastic deformation and interface friction process for ultrasonic welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 208–216. DOI: [10.1080/13621718.2016.1218601](https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1218601).
7. Huang Hui, Chen Jian, Lim Yong Chae, Hu Xiaohua, Cheng Jiahao, Feng Zhili, Sun Xin. Heat generation and deformation in ultrasonic welding of magnesium alloy AZ31. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 272, pp. 125–136. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2019.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.016).
8. Jedrasiak P., Shercliff H.R. Finite element analysis of heat generation in dissimilar alloy ultrasonic welding. *Materials & Design*, 2018, vol. 158, pp. 184–197. DOI: [10.1016/j.matdes.2018.07.041](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.041).
9. Kim Jisun, Kim Jeawoong, Kim Inju. Analysis of welding properties using various horn-tip patterns in the ultrasonic metal welding process. *Mechanics & Industry*, 2020, vol. 21, no. 1, article number 102. DOI: [10.1051/meca/2019078](https://doi.org/10.1051/meca/2019078).
10. Du Pengfei, Chen Weishan, Deng Jie, Li Kai, Liu Yingxiang. Effects of knurl tooth angle on mechanical and thermal behaviors of aluminum ultrasonic welding. *Ultrasonics*, 2020, vol. 108, article number 106207. DOI: [10.1016/j.ultras.2020.106207](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106207).
11. Ni Z.L., Li B.H., Liu Y., Huang L., Nazarov A., Wang X.X., Yuan Z.P., Ye F.X. Numerical analysis of ultrasonic spot welding of metal sheets: A review. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2023, vol. 28, no. 9, pp. 841–864. DOI: [10.1080/13621718.2023.2260625](https://doi.org/10.1080/13621718.2023.2260625).
12. Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Microstructure of a titanium sample produced by ultrasonic consolidation. *Letters on materials*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 153–157. DOI: [10.22226/2410-3535-2022-2-153-157](https://doi.org/10.22226/2410-3535-2022-2-153-157).

13. Shayakhmetova E.R., Murzinova M.A., Mukhametgalina A.A., Nazarov A.A. Structure evolution in ultrafine-grained nickel induced by ultrasonic welding. *Letters on materials*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 91–96. DOI: [10.48612/letters/2024-1-91-96](https://doi.org/10.48612/letters/2024-1-91-96).
14. Mukhametgalina A.A., Shayakhmetova E.R., Murzinova M.A., Nazarov A.A., Sarkeeva A.A. Effect of surface state on the quality of copper joints produced by ultrasonic welding. *Letters on materials*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 190–197. DOI: [10.48612/letters/2024-3-190-197](https://doi.org/10.48612/letters/2024-3-190-197).
15. Zhang Shicheng. Stress intensities at spot welds. *International Journal of Fracture*, 1997, vol. 88, pp. 167–185. DOI: [10.1023/A:1007461430066](https://doi.org/10.1023/A:1007461430066).
16. Zhang Shicheng. Stress intensities derived from stresses around a spot weld. *International Journal of Fracture*, 1999, vol. 99, pp. 239–257. DOI: [10.1023/A:1018608615567](https://doi.org/10.1023/A:1018608615567).
17. Radakovic D.J., Tumuluru M. Predicting resistance spot weld failure modes in shear tension tests of advanced high-strength automotive steels. *Welding Journal*, 2008, vol. 87, pp. 96s–105s.
18. Patel V.K., Bhole S.D., Chen D.L. Fatigue life estimation of ultrasonic spot welded Mg alloy joints. *Materials & Design*, 2014, vol. 62, pp. 124–132. DOI: [10.1016/j.matdes.2014.05.008](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.008).
19. Rosendo T., Tier M., Mazzaferro J., Mazzaferro C., Strohaecker T.R., Dos Santos J.F. Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under lap shear tensile loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, vol. 38, no. 12, pp. 1443–1455. DOI: [10.1111/ffe.12312](https://doi.org/10.1111/ffe.12312).
20. Zou Yangfan, Li Wenya, Yang Xiawei et al. Characterizations of dissimilar refill friction stir spot welding 2219 aluminum alloy joints of unequal thickness. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 79, pp. 91–101. DOI: [10.1016/j.jmapro.2022.04.062](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.062).
21. Peng He, Chen Daolun, Jiang Xianguan. 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. DOI: [10.3390/ma10050449](https://doi.org/10.3390/ma10050449).
22. Mohammed S.M.A.K., Dash S.S., Jiang Xianquan, Li Dongyang, Chen Daolun. Ultrasonic spot welding of 5182 aluminum alloy: evolution of microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 56, pp. 417–429. DOI: [10.1016/j.msea.2019.04.059](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.059).
23. Ma Qiuchen, Ma Jingyuan, Zhou Jianli, Ji Hongjun. Intrinsic dependence of welding quality and recrystallization on the surface-contacted micro-asperity scale during ultrasonic welding of Cu–Cu joints. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 17, pp. 353–364. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.011).
24. Bajaj D., Mehavarnam R., Fang Xingfan, Ma Ninshu Xu, Li Dongyang, Chen Daolun. Achieving superior aluminum-steel dissimilar joining via ultrasonic spot welding: microstructure and fracture behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, vol. 919, article number 147489. DOI: [10.1016/j.msea.2024.147489](https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147489).

UDC 534-8; 621.791.16

doi: 10.18323/2782-4039-2025-3-73-10

Strength of joints produced by ultrasonic spot welding of copper plates using tools with different tooth heights

Elvina R. Shayakhmetova, junior researcher

*Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa (Russia)*E-mail: elvinar@imsp.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1659-9922>

Received 30.06.2025

Revised 21.07.2025

Accepted 12.08.2025

Abstract: Ultrasonic welding of metals is an energy-efficient, environmentally friendly technology that allows producing solid-state joints between thin blanks. The widespread use of this technology is hampered by the low strength of the resulting joints and the instability of their properties. One of the ways to improve strength characteristics is to develop a welding tool that ensures stable transmission of ultrasonic vibration energy to the joint zone. For this purpose, a relief with teeth or pyramids of different shapes and heights is applied to the surface of the welding tip and anvil. This paper presents data on the fracture load and fracture energy of lap joints produced by ultrasonic spot welding of copper plates using tools with a tooth height of 0.1 and 0.4 mm. Ultrasonic welding was carried out with a frequency of 20 kHz and a vibration amplitude of 18–20 μ m, the welding duration was 2 and 3 s, the clamping force was 2.5 kN. The paper considers the features of the fracture of the produced joints and the distribution of normal strains in the weld spot, and results of calculation of stress intensity factors in its vicinity. It is shown that after ultrasonic welding for 3 s, the strength characteristics of the joints produced with different tools reach the highest values, they are close in magnitude, but the experimental data scatter is half as much after welding with a tool with small teeth. The joints produced with such a tool fractured along the interface of the joint, and after welding with a tool with large teeth, the fracture developed with nugget pull-out, which is explained by an increase in the stress intensity factor at the tip of the concentrator surrounding the weld spot.

Keywords: copper; ultrasonic welding of metals; solid-state joint; joint strength; welding tool relief; stress intensity factor.

Acknowledgments: This work was carried out within the state assignment of IMSP RAS (No. 124022900006-2). Part of experimental data was obtained during the accomplishment of a project supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-19-00617, <https://rscf.ru/project/22-19-00617/>). Electron microscopic studies and mechanical tests were carried out on the facilities of shared services center of IMSP RAS “Structural and Physical-Mechanical Studies of Materials”.

The author expresses deep gratitude to M.A. Murzinova, PhD (Engineering), and A.A. Nazarov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), for their assistance in conducting the research and a discussion of the results obtained.

The paper was written on the reports of the participants of the XII International School of Physical Materials Science (SPM-2025), Togliatti, September 15–19, 2025.

For citation: Shayakhmetova E.R. Strength of joints produced by ultrasonic spot welding of copper plates using tools with different tooth heights. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 3, pp. 125–136. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-3-73-10.