

УДК 621.791.01

Влияние зазора сварного соединения на его свойства: обзор

А.С. Бабкин¹, И.А. Бабкин², В.В. Терехов¹¹ ЛГТУ² АО «НЛМК-ИНЖИНИРИНГ»

The effect of a welding root opening on weld properties: a review

A.S. Babkin¹, I.A. Babkin², V.V. Terekhov¹¹ Lipetsk State Technical University² NLMK ENGINEERING JSC

Дан обзор исследований влияния зазора в сварном соединении на его свойства. Проанализированы работы, посвященные таким способам сварки соединений, как дуговая, лазерная и гибридная. Рассмотрено воздействие зазора на геометрические параметры сварного шва, механические свойства и деформацию. Выделены четыре группы исследований: поиск оптимального зазора, построение областей качественного формирования сварного шва, получение аналитических выражений для расчета зазора и численное моделирование процесса. Отмечено, что зазор — важнейший фактор, определяющий качество сварного соединения, но исследований его влияния на свойства шва, особенно для сварки неплавящимся электродом, в настоящее время недостаточно.

EDN: LSDFNR, <https://elibrary/l sdfnr>

Ключевые слова: ширина зазора, стыковое соединение, размеры сварного шва, дуговая сварка, лазерная сварка, гибридная сварка

This article provides a review of studies on the welding joint gap influence on its properties. It analyzes papers dedicated to the welding joints using various methods (arc, laser, and hybrid welding). The gap impact on the geometric parameters of the weld, mechanical properties and deformation are considered. Four groups of research are highlighted: the search of an optimal gap, the construction of quality weld formation regions, the derivation of analytical expressions for calculating the gap, and process numerical modeling. It is noted that the gap is a crucial factor determining the joint quality, but recently research of gap influence especially in GTAW is insufficient at now.

EDN: LSDFNR, <https://elibrary/l sdfnr>

Keywords: gap width, butt joint, weld dimensions, arc welding, laser welding, hybrid welding

Геометрические параметры подготовленных кромок сварных соединений (СС), в том числе ширина зазора, заданы в государственных стандартах, в частности при сварке СС в защитных газах — в ГОСТ 14771–76 [1], при сварке СС под флюсом — в ГОСТ 8713–79 [2]. Подготовка кромок стыков при сварке лучевыми способами

описана в международных стандартах ГОСТ ISO 9692-1–2016 [3] и ГОСТ ISO 9692-2–2020 [4]. Следует учитывать, что установка требуемой ширины зазора в стыке деталей по стандартам перед сваркой реальных конструкций является трудоемкой операцией, поэтому этот параметр часто не соответствует их рекоменда-

циям, вследствие чего необходимы исследования для количественной оценки его влияния на свойства сварного шва (СШ) и зону термического влияния (ЗТВ).

Цель работы — аналитический обзор современных зарубежных и отечественных исследований влияния зазора СС на размеры его проплавления, ЗТВ, механические свойства и деформацию при различных способах сварки плавлением.

Проанализируем известные результаты исследований влияния ширины зазора на такие свойства СС, как размеры СШ, его прочностные характеристики и деформация. Приведем сведения о сварке разными способами (дуговыми, лазером и гибридными лазерно-дуговыми) односторонних однопроходных СС без скоса кромок (если не указано другое СС). Согласно ГОСТ 14771–76 и ГОСТ 8713–79, такие СС обозначают как С2 и С28 соответственно.

Наибольшее количество публикаций посвящено самому распространенному способу сварки — дуговому [5–17]. Результаты исследования качественных взаимосвязей между шириной зазора, с одной стороны, и геометрическими

параметрами СШ и другими его свойствами, с другой, приведены в трудах [5, 7, 8, 9]. Некоторые исследования посвящены поиску оптимального диапазона изменения ширины зазора [5, 9, 18] или только одного ее значения [6] для качественного формирования СШ.

Рассмотрено влияние ширины зазора (0, 1 и 2 мм) при сварке в смеси аргона и 18 % углекислого газа стыковых двусторонних СС без скоса кромок из стали толщиной 8 мм на глубину проплавления и механические свойства при постоянных параметрах режима [6]. Показано, что достаточное перекрытие корня СШ достигается только при ширине зазора 2 мм.

При сварке неплавящимся электродом (Gas Tungsten Arc Welding — GTAW) — вольфрамовым электродом в аргоне — стали марки 1020 с постоянными параметрами режима (силой тока $I = 180$ А и скоростью сварки $v_{св} = 0,23$ см/с) исследовано влияние ширины зазора b ($b = 0, 0,5, 0,75, 1,0$ мм) на параметры СШ [7]. Установлено (рис. 1), что глубина проплавления незначительно возрастает при изменении ширины зазора от 0 до 0,5 мм, а затем значительно повышается с 2 до 5 мм при увеличении ширины за-

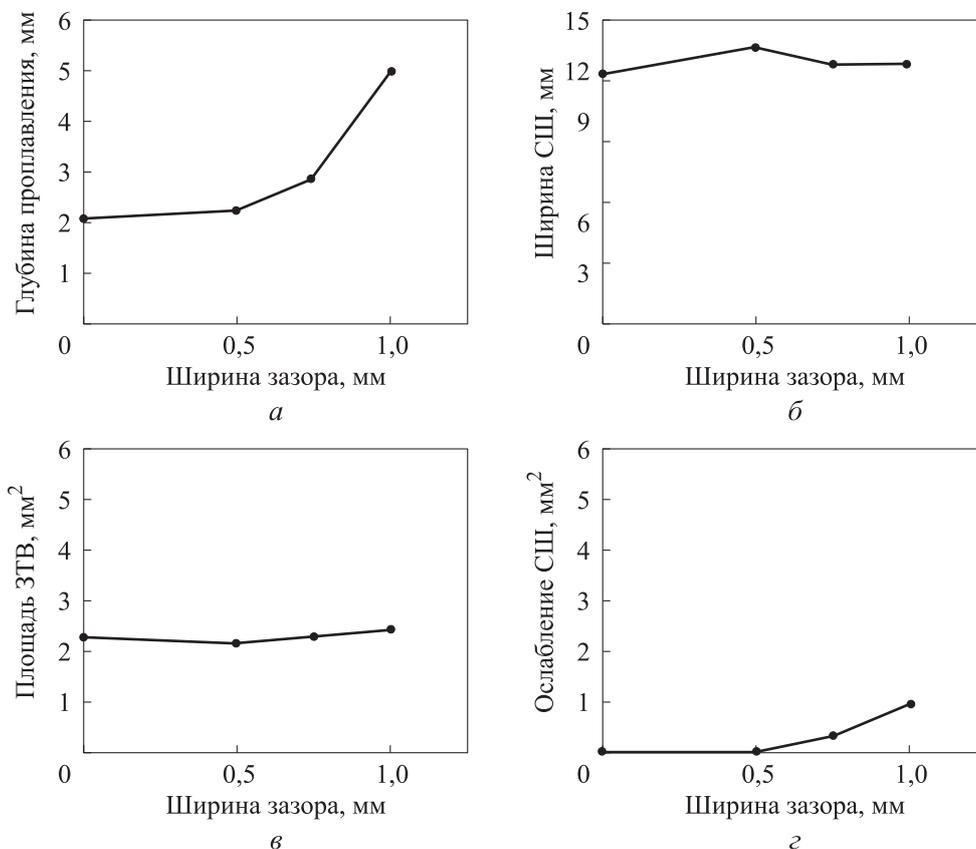


Рис. 1. Зависимости глубины проплавления (а), ширины СШ (б), площади ЗТВ (в) и ослабления СШ (г) от ширины зазора

зора с 0,5 до 1,0 мм. В то же время ширина СШ становится больше на 2 мм при расширении зазора до 0,5 мм, а затем уменьшается на 2 мм, начиная от ширины 0,5 мм и до 0,75 мм. При расширении зазора до 0,5 мм площадь ЗТВ и ослабление усиления СШ почти не меняются, а при увеличении ширины зазора до 1,0 мм — растут на 1 мм² и 1 мм соответственно.

Также установлено [8], что при сварке СС типа С2 сплошной проволокой диаметром 1,2 мм в среде Ar + 20 % CO₂, (рис. 2) глубина проплавления и ширина СШ увеличиваются примерно на 4 мм, а при расширении зазора с 0 до 2,5 мм и уменьшаются приблизительно на 2 мм. Сила тока и напряжение на дуге были постоянными и составляли 320 А и 32 В соответственно.

Способ GTAW применяют для сварки корневого прохода трубопроводов. GTAW с холодной присадочной проволокой (рис. 3) имеет такое преимущество перед другими способами сварки, как возможность независимого контроля силы сварочного тока и скорости подачи присадочной проволоки WFS. Однако определить эти параметры затруднительно.

В работе [9] в процессе GTAW изучали зависимость высоты усиления обратной стороны однопроходного СШ от ширины зазора и скорости подачи холодной присадочной проволоки при постоянной скорости сварки и трех зна-

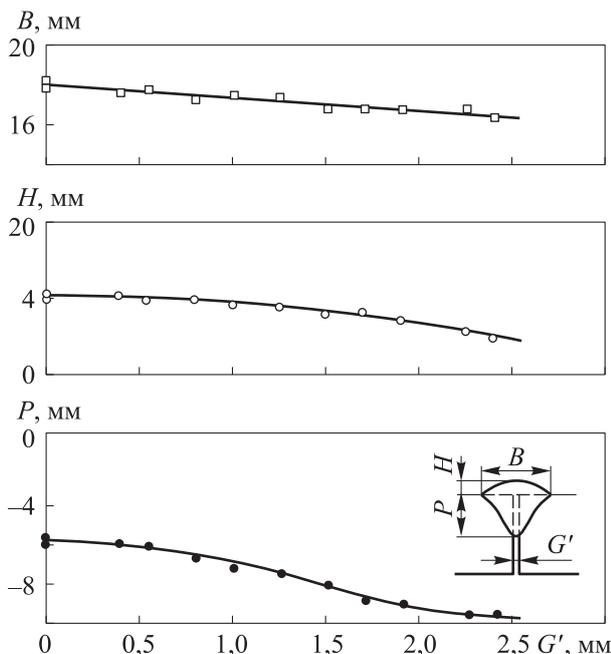


Рис. 2. Зависимости ширины СШ B , высоты усиления H и глубины проплавления шва P от ширины зазора после сварки G'

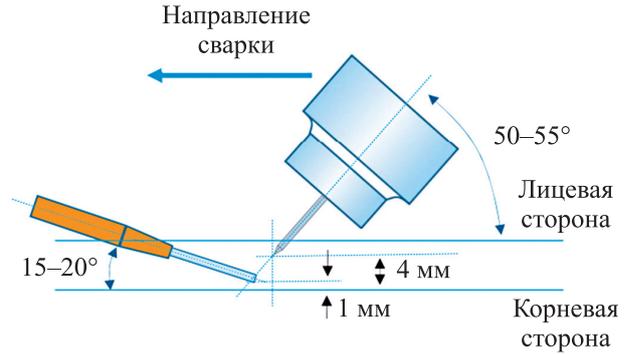


Рис. 3. Схема установки для сварки с зазором

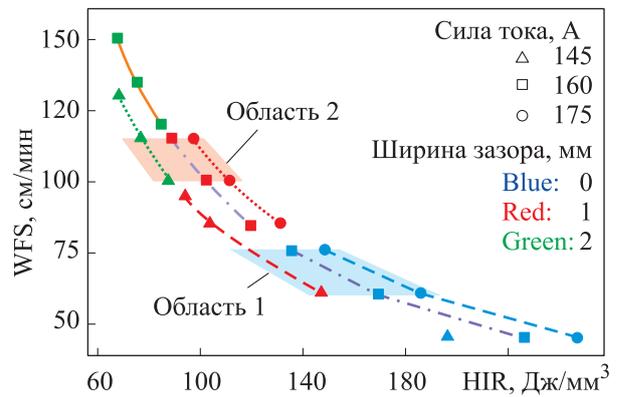


Рис. 4. Соотношения между параметрами WFS, HIR и зазором при различных значениях силы сварочного тока

чений силы сварочного тока. Стык имел угол скоса 60° без притупления кромок при толщине пластин 6 мм. В этих условиях возможны три вида формирования СШ: прожог, образование отрицательного усиления с обратной стороны СШ и качественное формирование СШ (с нулевым или положительным усилением с обратной стороны СШ). Качественное формирование СШ графически было представлено областью параметров WFS — HIR (рис. 4), где HIR — коэффициент подводимой теплоты сварки, выражающий количество тепловой мощности вносимой дугой в единицу объема металла и определяемый отношением погонной энергии к площади наплавленного металла, Дж/мм³.

При сварке под флюсом (Submerged Arc Welding — SAW) [2] стыкового одностороннего СС со скосом кромок [10], установлено что увеличение ширины зазора корня СС RO оказывает смешанное влияние на форму корневого валика — усредненные высоту проплавления корня h_{rf} и высоту корня h_{rc} (рис. 5).

С одной стороны, по мере увеличения ширины зазора корня СС RO высота проплавления корня h_{rf} уменьшается, а с другой — изме-

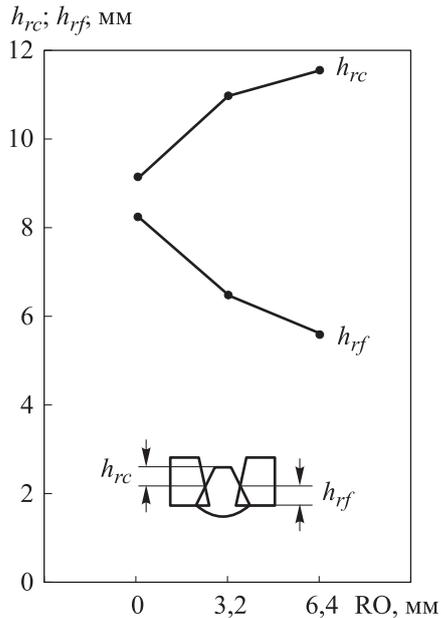


Рис. 5. Зависимости высоты проплавления корня h_{rf} и высоты корня h_{rc} от ширины зазора корня СС RO при силе тока $I = 900$ А и угле склоа $\beta = 30^\circ$

нение высоты корня СС h_{rc} зависит от силы сварочного тока I . При более низкой силе тока ($I < 700$ А) увеличение RO полезно, так как высота корня уменьшается, а следовательно, и шлаковые карманы. Однако при $I > 700$ А эта благоприятная тенденция вступает в противоречие с противоположной, вызванной увеличением силы тока, вследствие чего шлаковые карманы становятся глубже. Тем не менее, более низкие значения h_{rc} соответствуют более низкой силе тока независимо от RO. Увеличение RO оказывает благоприятное влияние на форму проплавления корня, так как его высота и ширина увеличиваются.

Известны работы, где выполнен количественный анализ влияния ширины зазора на размеры СШ. Впервые влияние ширины зазора в стыке на глубину проплавления оценено в работе [11], где предложена методика расчета параметров режима сварки под флюсом СС типа С29 [2] из малоуглеродистой стали, согласно которой сила сварочного тока I и скорость сварки $v_{св}$ определяются следующими эмпирическими выражениями:

$$I = 100\sqrt{10(h-b)};$$

$$v_{св} = \frac{v_3}{0,025s(b+3)},$$

где h — глубина проплавления, мм; b — ширина зазора, мм; v_3 — скорость подачи электродной проволоки, м/ч; s — толщина металла, мм.

Также в работе [11] дано соотношение $b = 0,2s$ для оптимальной ширины зазора при сварке под флюсом малоуглеродистой стали толщиной 10...50 мм.

Анализом сил, действующих на сварочную ванну, в статье [12] выведена формула для расчета максимально допускаемой ширины зазора при сварке под флюсом, учитывающая физические свойства (поверхностное натяжение и плотность) расплавленного свариваемого металла и флюса:

$$b = \frac{2(\sigma_{м-ш} + \sigma_{ш-г})}{g[h_{фл}\rho_1 + \rho_2(a_1T_{св} + b_1)] + \frac{\sigma_{м-ш}}{a_2I_{св} + b_2}},$$

где $\sigma_{м-ш}$ — межфазное натяжение металл — шлак; $\sigma_{ш-г}$ — межфазное натяжение шлак — газовая фаза; g — ускорение свободного падения; $h_{фл}$ — высота слоя флюса; ρ_1 — плотность расплава сварочной ванны; ρ_2 — насыпной вес слоя флюса; a_1 , b_1 , a_2 , b_2 — коэффициенты, значения которых определены в работе [14]; $T_{св}$ — температура сварочной ванны; $I_{св}$ — сила сварочного тока.

Сварка под флюсом однопроходных СС типа С28 [2] на флюсовой подушке из низколегированных сталей толщиной до 10 мм исследована в статье [13]. Разработана методика выбора параметров режима сварки на основе концепции эффективной толщины СС s_{ef} :

$$Es - sb = Es_{ef},$$

где E — ширина СШ.

В работе [14] предложено учитывать влияние ширины зазора в стыке и глубины разделки кромок на глубину проплавления при сварке под флюсом стыковых СС с разделкой кромок по соотношению

$$h_{пр} = h_{п0} + h_p + 0,87b - k,$$

где $h_{пр}$ и $h_{п0}$ — глубина проплавления при сварке с разделкой и без разделки кромок, мм; h_p — глубина разделки кромок, мм; k — поправочный коэффициент, равный 5,2 мм и применяемый при $h_p \geq 6$ мм.

На основе экспериментальных данных, полученных при сварке в смеси $Ar + 25\% CO_2$ образцов толщиной 5 мм, имитирующих СС типа С2 из низкоуглеродистой стали с шириной зазора 0,5...2,5 мм, выведена [15] зависимость для расчета глубины проплавления СШ

$$h = h_n + 0,8b^{1,024}$$

и ширины СШ

$$E = 0,069 \frac{I^{1,051}}{v_{св}^{0,324}}.$$

Согласно данным работы [15], ширина СШ не зависит от зазора.

Влияние зазора в стыке СС типа С2 и С7 [1] и параметров режима сварки в углекислом газе на размеры СШ рассмотрено в статье [16]. Установлено, что кроме глубины проплавления зазор влияет на ширину СШ, что совпадает с данными публикаций [7, 8]. С помощью критериев подобия получены уравнения для расчета по заданным параметрам режима глубины проплавления и ширины СШ, учитывающие вклад зазора в их формирование.

В работе [17] для исследования сварки плавящимся электродом в смеси, содержащей 18 % CO_2 и 82 % Ar , пластин из низколегированной стали 31CrV3 и низкоуглеродистой стали S235 размерами $6,5 \times 55 \times 100$ и $4 \times 50 \times 200$ мм соответственно, были подготовлены стыковые СС с разделкой кромок (высота разделки 3 мм, угол скоса кромки 30° при ширине зазора $b = 0, 1,0$ и $1,5$ мм). Обработкой экспериментальных данных получено выражение для определения глубины проплавления

$$h = -0,716 + 1,21b + 0,68h_p + 0,003q_n,$$

где q_n — погонная энергия, кДж/см.

Следует отметить, что известно ограниченное число работ по численному моделированию (симуляции) процессов дуговой сварки с учетом влияния ширины зазора.

В статье [19] рассмотрена математическая модель формирования СШ при лазерной сварке (Laser Beam Welding — LBW), включающая в себя стыковые и нахлесточные СС с зазором. Целью моделирования являлось прогнозирование влияния технологических параметров на такие размеры СШ, как высота усиления, площадь поперечного сечения, вогнутость СШ или его корня. Модель основана на уравнениях переноса энергии и равновесия на свободных поверхностях для балансировки давления паров, капиллярного давления и поправочного члена. Поправочный член позволяет сбалансировать объем металла с учетом термического расширения и усадки при сварке и ширину зазора между соединяемыми деталями.

Модель, предложенная в работе [20], достаточно хорошо объясняет влияние ширины зазора на длину сварочной ванны, а также пере-

ход от сварки с полным проплавлением к такой с частичным проплавлением.

Расхождение и сближение кромок стыкового СС без скоса кромок путем численного моделирования методом конечных элементов термических упругопластических деформаций рассмотрено в статье [21]. Исследовано влияние погонной энергии, толщины СС, скорости сварки, ширины пластины и отношения глубины проплавления к толщине пластины на расхождение и сближение кромок. С помощью двух размерных величин

$$\beta_1 = \frac{q_n}{s} E \text{ и } \beta_2 = \left(\frac{q_n}{s} \right)^2 v_{св}$$

графически ограничили области, в которых происходит сближение или расхождение кромок СС. Установлено, что при $\beta_1 \leq 0,3$ Дж/мм³ и $\beta_2 \leq 0,26 \cdot 10^{-5}$ Дж/(мм³·с) происходит сближение кромок, а в остальной области изменения этих величин — расхождение кромок.

В работе [22] отмечено, что при плазменно-дуговой сварке стыкового СС типа С2 толщиной 9 мм трудно получить полное проплавление при ширине зазора менее 0,5 мм и сформировать обратную сторону СШ при ширине зазора более 2,0 мм.

В настоящее время имеется большое количество публикаций, посвященных исследованию влияния зазора на формирование СШ при лазерной сварке, где его ширина может быть менее 0,05 мм. В отличие от дуговой сварки, влияние ширины зазора является противоположным: еще в ранней работе [23] показано, что с увеличением ширины зазора мощность, поглощаемая заготовкой, и скорость плавления материала уменьшаются. Когда ширина зазора достигает критического размера, имеющийся расплав не может перекрыть путь лучу, и процесс сварки прекращается.

Результаты исследования процесса лазерной сварки нахлесточных СС из нержавеющей стали 304L толщиной 3 мм при ширине зазора $b = 0,2; 0,5$ и $1,0$ мм приведены в работе [24]. Выявлено, что с увеличением ширины сварочных зазоров сварочная деформация растет. Наибольшие значения деформации в направлении оси Z, равные 4 мм, получены при ширине зазора 1,0 мм.

Исследовано влияние ширины зазора на структуру и свойства нержавеющей сталей при лазерной сварке [25]. Установлено, что зазор оказывает влияние на морфологию СС. При

увеличении ширины зазора с 0,1 до 0,4 мм проплавление СШ уменьшается, исчезает усиление. Также с возрастанием зазора меняется направление роста ячеистых кристаллитов с его боковых стенок на восходящий рост от нижней пластины. Вследствие изменения структуры металла чрезмерная ширина зазора приводит к снижению предела прочности и усталостной прочности СС. Показано, что ширина сборочного зазора должна быть менее 0,1 мм, чтобы гарантировать соответствие морфологии поверхности и механических свойств СС требованиям качества.

В работе [26] для однопроходной сварки высокопрочной легированной стали 30CrMnSiA при фиксированных параметрах режима лазерной сварки (мощности 3,4 кВт и скорости 600 мм/мин) оптимизированы ширина зазора стыкового СС и фокусное расстояние относительно выходных параметров сварки: деформации, предела прочности на разрыв (UTS) и остаточных напряжений (RS). Ширину зазора стыкового СС изменяли в пределах 0...0,5 мм с шагом 0,1 мм. Установлено, что деформация, UTS и RS при ширине зазора $b = 0,2, 0,3$ и 0,4 мм меньше соответственно на 60, 95 и 20 %, чем значения, полученные при ширине зазора 0,4 и 0,5 мм.

Некоторые исследования посвящены гибридным способам сварки (Hybrid Laser Arc Welding — HLAW). Так, в работе [27] рассмотрены два метода сварки стыкового СС с широким зазором до 2 мм. Первый — сварка с помощью двух лазерных лучей Nd:YAD и присадочной проволоки, второй — сварка с помощью гибридной сварки YAG-лазер — GTAW с присадочной проволокой. При двухлучевой сварке нержавеющей стали марки 304 толщиной 5 мм использованы два лазера Nd:YAG мощностью 2 кВт, расположенные тандемом или параллельно. Без присадочной проволоки допуск на ширину зазора для получения прочного СШ составлял 0,7 и 1,6 мм при тандемном и параллельном расположении соответственно. С применением присадочной проволоки СС с зазором шириной 2,2 мм успешно сварили при тандемном расположении, но в нижней части СШ при ширине зазора 1,9 мм произошел прожег. Однако при сварке с параллельным расположением присадочной проволоки качественная сварка была достигнута при зазоре до 2,2 мм за счет оптимизации расстояния между дугами.

В работе [28] определены и графически представлены области режимов гибридной лазерно-дуговой сварки — сварки плавящимся электродом в защитных газах (Gas Metal Arc Welding — GMAW) с присадкой в координатах «ширина зазора — скорость сварки», в которых формируются СШ с неполным проплавлением, образованием обратного валика и полным проплавлением при фиксированных параметрах (силе тока 150 А и скорости подачи электродной проволоки $v_s = 6,3$ м/мин).

Изучено влияние ширины зазора на формирование СШ, полученного гибридной сваркой лазер + GMAW, при постоянных параметрах режима для двух видов переноса электродного металла: импульсного и «холодного» (Cold Metal Transfer — CMT) [18]. Установлено, что независимо от вида переноса электродного металла при расширении зазора более некоторого предельного значения верхнее усиление СШ принимает отрицательное значение (происходит ослабление СШ), при ширине зазора 0,8 мм в стыке образуется только мостик жидкого металла, а при еще более широком зазоре наблюдается прожог.

Исследовано влияние ширины зазора на геометрические параметры и механические свойства металла СШ при сварке способом HLAW судостроительной стали RSE36 толщиной 7 мм [29]. При ширине зазора $b = 0...0,3$ мм наблюдалось наилучшее качество СС без внешних дефектов, при $b = 0,6...0,9$ мм — хорошее, но с подрезами, а при $b = 1,2$ мм СС — отрицательное усиление СШ. В диапазоне ширины зазора 0,3...1,2 мм ширина СШ сверху не изменялась, а при $b = 0...0,3$ мм несколько уменьшалась. Также обнаружено, что увеличение ширины зазора с 0 до 1,2 мм снижает эффективность сварки с 30,6 до 22,7 %.

Установлено [30], что увеличение ширины зазора b приводит к увеличению глубины проплавления h , площади зоны проплавления и производительности сварки при постоянных параметрах сварки способом HLAW (рис. 6). Геометрические параметры СШ и тепловые характеристики процесса HLAW при различных значениях ширины зазора приведены в таблице, где E_n — ширина СШ с лицевой стороны; Ψ — коэффициент формы проплавления, $\Psi = E_n/h$; S_{mz} — площадь зоны проплавления; Q_w — суммарная мощность сварочных источников; Q_j — мощность, полученная СС; η_{td} — тепловой коэффициент полезного действия.

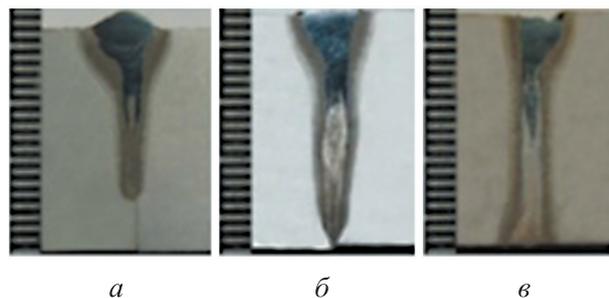


Рис. 6. Макрошлифы СС, полученных способом HLAW, в нижнем положении при ширине зазора $b = 0$ (а), 0,5 (б) и 1,0 мм (в)

Геометрические параметры СШ и тепловые характеристики процесса HLAW при различных значениях ширины зазора

b , мм	$E_{л}$, мм	h , мм	Ψ	S_{mz} , мм ²	Q_w , кВт	Q_p , кВт	η_{td} , %
0	5,9	15,1	0,39	31,2	20,5	5,16	25,2
0,5	4,6	19,8	0,23	40,2	20,9	6,65	31,8
1,0	3,7	20	0,19	42,6	20,8	7,04	33,8

Таким образом, установлено, что при гибридной лазерно-дуговой сварке влияние зазора на размеры СШ аналогично таковому при дуговой сварке.

Экономические аспекты влияния зазора на сварочную технологию оценены в работах [31, 32]. Обследованием некоего шведского предприятия установлено [31] наличие значительного разброса ширины зазора в СС. Кроме того, до 35 % СШ, исследованных на этом предприятии, имели дополнительный корневой проход, вызванный неоправданно большим зазором при сборке, что стало неожиданностью. Изменение ширины зазора влияет на эффективность применения ресурсов, увеличивая образование дефектов, время производства и использование сварочных материалов. Результаты исследования [32] указывают на большой потенциал повышения эффективности производства, которого можно достичь без крупных инвестиций уменьшением дисперсии ширины зазора.

При электронно-лучевой сварке (Electronic Beam Welding — EBW) образцов с раскрывающимся зазором исследовано влияние его ширины и силы тока электронного пучка с постоянной силой тока фокусирующей системы на глубину проплавления [33]. Установлено, что во всех исследованных случаях сварки плотность мощности в пятне нагрева падает вслед-

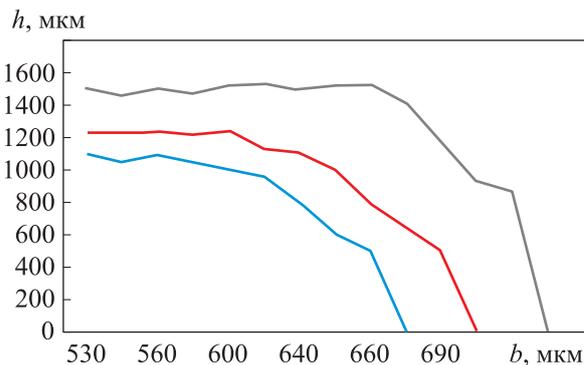


Рис. 7. Зависимости глубины проплавления h от ширины зазора b при силе тока электронного пучка $I_{эл.п} = 9$ (—), 10 (—) и 11 мА (—)

ствие попадания части электронного пучка в зазор между свариваемыми кромками, что приводит к уменьшению глубины проплавления с ростом ширины зазора.

Зависимости глубины проплавления h от ширины зазора b при силе тока электронного пучка $I_{эл.п} = 9, 10$ и 11 мА приведены на рис. 7. Видно, что увеличение ширины зазора с 0,53 до 0,56 мм при силе тока $I_{эл.п} = 9$ мА, до 0,63 мм при $I_{эл.п} = 10$ мА и до 0,67 мм при $I_{эл.п} = 11$ мА не приводит к изменению глубины проплавления. Дальнейшее возрастание ширины зазора вызывает резкое падение глубины проплавления: при ширине зазора $b = 0,67...0,70$ мм и силе тока $I_{эл.п} = 9$ и 10 мА — с 1,0...1,2 мм до нуля, а $I_{эл.п} = 11$ мА способствует падению глубины проплавления с 1,5 мм до 0 при ширине зазора 0,79 мм. Таким образом, установлено, что при электронно-лучевой сварке влияние зазора на глубину проплавления аналогично таковому при лазерной сварке.

Гистограммы распределения проанализированных публикаций, посвященных исследованию влияния зазора на свойства СШ, по способам сварки и результатам (целям) исследования приведены на рис. 8 а и б. Видно, что наименьшее количество составляют публикации по электронно-лучевой сварке и сварке неплавящимся электродом, а наибольшее — по сварке плавящимся электродом в защитных газах. Известные работы в основном посвящены поиску диапазонов (областей) изменения ширины зазора, обеспечивающих качественное формирование СШ при постоянных параметрах режима сварки. Несмотря на значительный потенциал, построение математических моделей (особенно численных) в на-

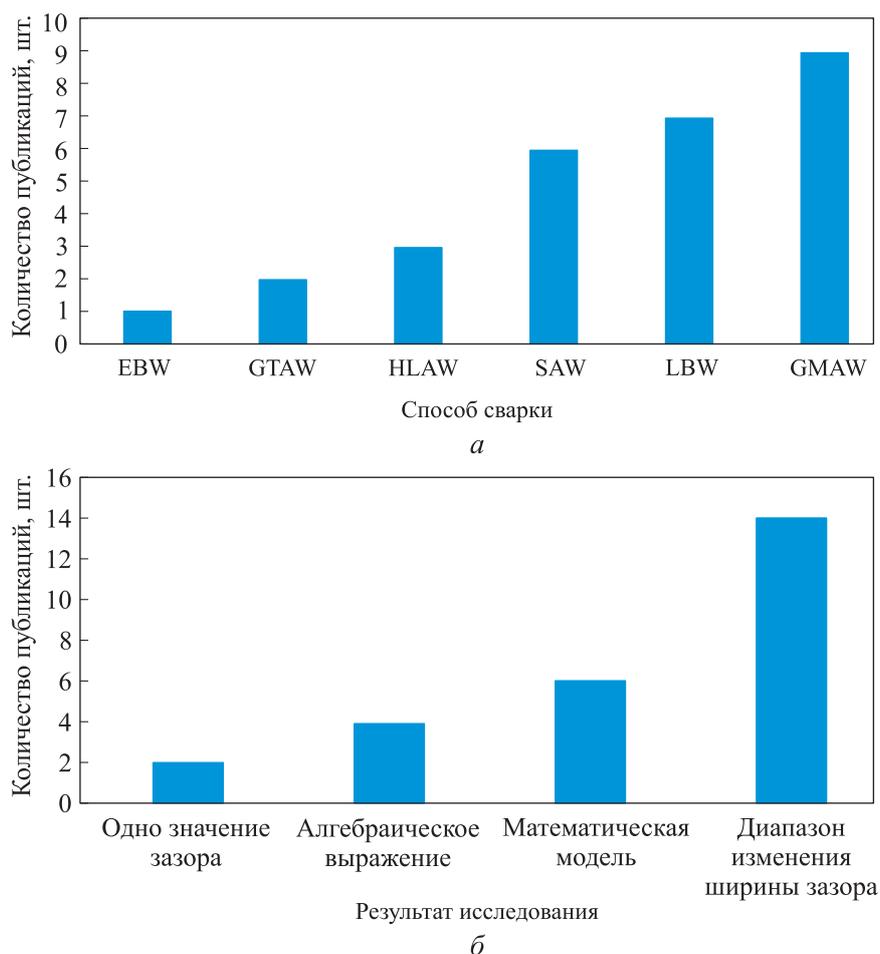


Рис. 8. Распределение публикаций, посвященных исследованию влияния зазора на свойства СШ, по способам сварки (а) и полученным результатам (б)

стоящее время не относится к приоритетным направлениям исследований.

Выводы

1. Зазор в стыке СС наряду с параметрами режима является важнейшим фактором, определяющим размеры СШ и качество СС. Неверное соотношение между зазором и параметрами режима может привести к таким дефектам СС, как прожог или непровар, несплавление кромок и изменение выпуклости СШ на отрицательную. Кроме того, изменяются условия нагрева, охлаждения и кристаллизации и, как следствие, структура и механические свойства СС.

2. Выявлены четыре группы исследований влияния зазора на свойства СС. В первой группе цель исследований состоит в поиске единственного значения ширины зазора, обеспечивающего при заданных параметрах режима и

подготовленных кромок качественное формирование СШ. Вторую группу образуют исследования, позволяющие графически описать области формирования СШ (качественные и дефектные) как функцию некоторых параметров режима сварки при фиксированных параметрах СС. В состав третьей группы входят исследования, результат которых представлен в виде аналитических выражений, позволяющих рассчитывать оптимальный зазор в стыке как функцию только параметров СС или параметров режима и СС. Четвертая группа исследований направлена на разработку численных моделей влияния зазора и параметров режима на формирование СС.

3. Наиболее широко представлены публикации по дуговым способам сварки (под флюсом и плавящимся электродом в защитных газах). В последнее время большой объем исследований выполнен для лазерной сварки и гибридной лазерно-дуговой сварки.

4. При лазерной и электронно-лучевой сварке глубина проплавления уменьшается с увеличением ширины зазора, что противоположно ее влиянию при дуговой и гибридной лазерно-дуговой сварке.

5. Несмотря на существенное влияние зазора на формирование СШ, исследований, посвященных этой теме недостаточно, особенно для сварки неплавящимся электродом. Также в не-

полной мере исследованы механизмы влияния параметров подготовленных кромок на структурные и механические свойства СС.

6. Уменьшение дисперсии ширины зазора при сварке способствует повышению эффективности использования ресурсов, уменьшая образование дефектов и сокращая время производства.

Литература

- [1] ГОСТ 14771–76. *Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры*. Москва, Изд-во стандартов, 1980. 56 с.
- [2] ГОСТ 8713–79. *Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры*. Москва, Изд-во стандартов, 1982. 63 с.
- [3] ГОСТ ISO 9692-1–2016. *Сварка и родственные процессы. Типы подготовки соединений. Часть 1. Сварка ручная дуговая плавящимся электродом, сварка дуговая плавящимся электродом в защитном газе, сварка газовая, сварка дуговая вольфрамовым электродом в инертном газе и сварка лучевая сталей*. Москва, Изд-во стандартов, 2017. 19 с.
- [4] ГОСТ ISO 9692-2–2020. *Сварка и родственные процессы типы подготовки соединений Часть 2. Сварка дуговая сталей под флюсом*. Москва, Изд-во стандартов, 2020. 12 с.
- [5] Ferdinandov N., Gospodinov D., Ilieva M. et al. Effect of the root gap on the structure and properties of high strength steel S700MC welds. *Key Eng. Mater.*, 2021, vol. 890, pp. 201–208, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.890.201>
- [6] Ermis K., Celikten E. The effect of the gap between the materials on the weld penetration and mechanical values in the MAG butt weld joint. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 1650–1657.
- [7] Kumar K., Ahirwar P., Masanta M. et al. Effect of varying root gap on butt welding of 6 mm thick AISI 1020 plate by autogenous TIG welding process. *Mater. Sci. Forum*, 2016, vol. 880, pp. 21–24, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.880.21>
- [8] Sugitary Y., Nishi Y. Fundamental investigation of Optimum Control method. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 1989, vol. 7, no. 1, pp. 15–21, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.7.15>
- [9] Park D., Song Ch., Park Y. A study on gap bridging formation conditions in butt root pass welding using GTAW. *J. Weld. Join.*, 2023, vol. 41, no. 5, pp. 335–341, doi: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2023.41.5.3>
- [10] Malin V. Root weld formation in modified refractory flux one-sided welding. Part 2: Effect of joint geometry. *Weld. J.*, 2001, vol. 9, pp. 227–237.
- [11] Донченко В.Ф. Обоснование параметров режима автоматической сварки под флюсом стыковых соединений по зазору. *Сварочное производство*, 1965, № 5, с. 25–28.
- [12] Завьялов В.Е., Зернов А.В., Авдеев М.В. Определение допустимой величины зазора в стыке при двусторонней автоматической сварке под флюсом со свободным формированием первого шва. *Сварочное производство*, 1975, № 2, с. 11–13.
- [13] Безбах Д.Н. Влияние глубины разделки кромок на глубину проплавления при сварке под флюсом. *Сварочное производство*, 1979, № 4, с. 22–23.
- [14] Bezbakh D.K. Effect of the width of the gap on the formation of one-sided butt welded joints in automatic submerged-arc welding. *Weld. Int.*, 1989, vol. 3, no. 9, pp. 747–748.
- [15] Коринец И.Ф., Чун Ц.Ч. Влияние зазора на размеры стыкового шва при дуговой сварке в смеси Ar + 25% CO₂ плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, 2002, № 8, с. 16–19.
- [16] Babkin A.S. Effect of the gap and welding conditions on weld dimensions. *Weld. Int.*, 2006, vol. 20, no. 4, pp. 300–306, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3612>
- [17] Kaşıkçı İ. *Effect of gap distance on the mechanical properties and cross-sectional characteristics of the MIG-MAG butt welds*. URL: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/1027283/index.pdf> (дата обращения: 10.12.2024).

- [18] Lamas J., Frostevarg J., Kaplan A.F.H. Gap bridging for two modes of laser arc hybrid welding. *J. Mater. Process. Technol.*, 2015, vol. 224, pp. 73–79, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.022>
- [19] Sudniky W., Radajzand D., Erofeev W. Computerized simulation of laser beam weld formation comprising joint gaps. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 1998, vol. 31, no. 24, pp. 3475–3480, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/24/011>
- [20] Sudnik W., Radaj D., Breitschwerdt S. et al. Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, vol. 33, no. 6, pp. 662–671, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/6/312>
- [21] Okano S., Mochizuki M. A discussion about opening and closing behavior of root gap during butt welding and its affectors. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 2016, vol. 34, no. 1, pp. 26–34, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.34.26>
- [22] Ishida K., Tashiro S., Mizutani M. et al. Study on the weld bead formation on square-groove butt joint using plasma-MIG hybrid welding process. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 2020, vol. 38, no. 2, pp. 135–138, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.38.135s>
- [23] Lampa C., Powell J., Ivarson A. et al. The influence of gap width on laser welding. *ICALEO '95*, 1995, pp. 504–512, doi: <https://doi.org/10.2351/1.5058948>
- [24] Zhang L., Peng G., Yang F. et al. Effect of welding gap of thin plate butt welds on inherent strain and welding deformation of a large complex box structure. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 9, pp. 19–34, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17091934>
- [25] Wang H., Wang Y., Li X. et al. Influence of assembly gap size on the structure and properties of SUS301L stainless steel laser welded lap joint. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 4, p. 996, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14040996>
- [26] Waqas M., Israr A., Qureshi M.E. et al. Experimental and statistical investigation of laser welding with different joint gap widths for HSLA steel. *Smart Mater. Manuf.*, 2024, vol. 2, art. 100057, doi: <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100057>
- [27] Ohashi R., Fujinaga S., Katayama S. et al. Extension of gap tolerance in square butt joint welding with Nd: YAG Laser. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 2003, vol. 21, no. 1, pp. 25–32, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.21.25>
- [28] Wang J., Nishimura H., Takenaka Y. et al. Study of bead formation and gap tolerance in laser arc hybrid welding of aluminum alloy with filler addition. *Preprints of the National Meeting of JWS*, 2008, art. 326, doi: <https://doi.org/10.14920/jwstakai.2008f.0.326.0>
- [29] Turichin G., Tsibulskiy I., Kuznetsov M. et al. Influence of the gap width on the geometry of the welded joint in hybrid laser-arc welding. *Phys. Procedia*, 2015, vol. 78, pp. 14–23, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.013>
- [30] Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M., Akhmetov A.D. Effect of welding position and gap between samples on hybrid laser-arc welding efficiency. *Appl. Mech. Mater.*, 2014, vol. 682, pp. 35–40, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.35>
- [31] Öberg A.E., Wikstrand S., Mattsson V. *Impact of gaps on resource efficiency in heavy welding industry*. URL: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/240909/local_240909.pdf (дата обращения: 12.12.2024).
- [32] Öberg A.E., Åstrand E. Improved productivity by reduced variation in gas metal arc welding (GMAW). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 1–4, pp. 1027–1038, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0214-4>
- [33] Касицын А.Н., Агафонов Р.Ю., Леонов А.В. и др. Управление параметрами ЭЛС на основе данных системы сканирования зазора между свариваемыми кромками в процессе сварки. *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Мат. Третьей межд. конф.* Москва, Изд-во МЭИ, 2020, с. 451–457. EDN: QELEUM

References

- [1] GOST 14771–76. *Dugovaya svarka v zashchitnom gaze. Soedineniya svarnye. Osnovnyye tipy, konstruktivnyye elementy i razmery* [Gas-shielded arc welding. Welded joints. Main types, design elements and dimensions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1980. 56 p. (In Russ.).

- [2] GOST 8713–79. *Svarka pod flyusom. Soedineniya svarnye. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery* [Flux welding. Welded joints. Main types design elements and dimensions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1982. 63 p. (In Russ.).
- [3] GOST ISO 9692-1–2016. *Svarka i rodstvennye protsessy. Tipy podgotovki soedineniy. Chast 1. Svarka ruchnaya dugovaya plavyashchimsya elektrodom, svarka dugovaya plavyashchimsya elektrodom v zashchitnom gaze, svarka gazovaya, svarka dugovaya volframovym elektrodom v inertnom gaze i svarka luchelevaya staley* [Welding and allied processes. Types of joint preparation. Part 1. Manual metal arc welding, gas-shielded metal arc welding, gas welding, TIG welding and beam welding of steels]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2017. 19 p. (In Russ.).
- [4] GOST ISO 9692-2–2020. *Svarka i rodstvennye protsessy tipy podgotovki soedineniy Chast 2. Svarka dugovaya staley pod flyusom* [Welding and allied processes. Joint preparation. Part 2. Submerged arc welding of steels]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2020. 12 p. (In Russ.).
- [5] Ferdinandov N., Gospodinov D., Ilieva M. et al. Effect of the root gap on the structure and properties of high strength steel S700MC welds. *Key Eng. Mater.*, 2021, vol. 890, pp. 201–208, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.890.201>
- [6] Ermis K., Celikten E. The effect of the gap between the materials on the weld penetration and mechanical values in the MAG butt weld joint. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 1650–1657.
- [7] Kumar K., Ahirwar P., Masanta M. et al. Effect of varying root gap on butt welding of 6 mm thick AISI 1020 plate by autogenous TIG welding process. *Mater. Sci. Forum*, 2016, vol. 880, pp. 21–24, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.880.21>
- [8] Sugitary Y., Nishi Y. Fundamental investigation of Optimum Control method. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 1989, vol. 7, no. 1, pp. 15–21, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.7.15>
- [9] Park D., Song Ch., Park Y. A study on gap bridging formation conditions in butt root pass welding using GTAW. *J. Weld. Join.*, 2023, vol. 41, no. 5, pp. 335–341, doi: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2023.41.5.3>
- [10] Malin V. Root weld formation in modified refractory flux one-sided welding. Part 2: Effect of joint geometry. *Weld. J.*, 2001, vol. 9, pp. 227–237.
- [11] Donchenko V.F. Justification of automatic submerged-arc welding mode parameters of butt joints by gap. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1965, no. 5, pp. 25–28. (In Russ.).
- [12] Zavyalov V.E., Zernov A.V., Avdeev M.V. Determination of the permissible value of the gap in the joint at bilateral automatic submerged-arc welding with free formation of the first seam. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1975, no. 2, pp. 11–13. (In Russ.).
- [13] Bezbakh D.N. Influence of edge depth on penetration depth at submerged-arc welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1979, no. 4, pp. 22–23. (In Russ.).
- [14] Bezbakh D.K. Effect of the width of the gap on the formation of one-sided butt welded joints in automatic submerged-arc welding. *Weld. Int.*, 1989, vol. 3, no. 9, pp. 747–748.
- [15] Korinets I.F., Chun Ts.Ch. Influence of gap on butt weld dimensions at arc welding in Ag + 25% CO₂ mixture with a fusion electrode. *Avtomaticheskaya svarka*, 2002, no. 8, pp. 16–19. (In Russ.).
- [16] Babkin A.S. Effect of the gap and welding conditions on weld dimensions. *Weld. Int.*, 2006, vol. 20, no. 4, pp. 300–306, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3612>
- [17] Kaşıkçı İ. Effect of gap distance on the mechanical properties and cross-sectional characteristics of the MIG-MAG butt welds. URL: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/1027283/index.pdf> (accessed: 10.12.2024).
- [18] Lamas J., Frostevarg J., Kaplan A.F.H. Gap bridging for two modes of laser arc hybrid welding. *J. Mater. Process. Technol.*, 2015, vol. 224, pp. 73–79, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.022>
- [19] Sudniky W., Radajzand D., Erofeev W. Computerized simulation of laser beam weld formation comprising joint gaps. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 1998, vol. 31, no. 24, pp. 3475–3480, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/24/011>
- [20] Sudnik W., Radaj D., Breitschwerdt S. et al. Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, vol. 33, no. 6, pp. 662–671, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/6/312>

- [21] Okano S., Mochizuki M. A discussion about opening and closing behavior of root gap during butt welding and its affectors. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 2016, vol. 34, no. 1, pp. 26–34, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.34.26>
- [22] Ishida K., Tashiro S., Mizutani M. et al. Study on the weld bead formation on square-groove butt joint using plasma-MIG hybrid welding process. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 2020, vol. 38, no. 2, pp. 135–138, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.38.135s>
- [23] Lampa C., Powell J., Ivarson A. et al. The influence of gap width on laser welding. *ICALEO '95*, 1995, pp. 504–512, doi: <https://doi.org/10.2351/1.5058948>
- [24] Zhang L., Peng G., Yang F. et al. Effect of welding gap of thin plate butt welds on inherent strain and welding deformation of a large complex box structure. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 9, pp. 19–34, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17091934>
- [25] Wang H., Wang Y., Li X. et al. Influence of assembly gap size on the structure and properties of SUS301L stainless steel laser welded lap joint. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 4, p. 996, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14040996>
- [26] Waqas M., Israr A., Qureshi M.E. et al. Experimental and statistical investigation of laser welding with different joint gap widths for HSLA steel. *Smart Mater. Manuf.*, 2024, vol. 2, art. 100057, doi: <https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100057>
- [27] Ohashi R., Fujinaga S., Katayama S. et al. Extension of gap tolerance in square butt joint welding with Nd: YAG Laser. *Quart. J. Jpn. Weld. Soc.*, 2003, vol. 21, no. 1, pp. 25–32, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.21.25>
- [28] Wang J., Nishimura H., Takenaka Y. et al. Study of bead formation and gap tolerance in laser arc hybrid welding of aluminum alloy with filler addition. *Preprints of the National Meeting of JWS*, 2008, art. 326, doi: <https://doi.org/10.14920/jwstaikai.2008f.0.326.0>
- [29] Turichin G., Tsibulskiy I., Kuznetsov M. et al. Influence of the gap width on the geometry of the welded joint in hybrid laser-arc welding. *Phys. Procedia*, 2015, vol. 78, pp. 14–23, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.013>
- [30] Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M., Akhmetov A.D. Effect of welding position and gap between samples on hybrid laser-arc welding efficiency. *Appl. Mech. Mater.*, 2014, vol. 682, pp. 35–40, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.35>
- [31] Öberg A.E., Wikstrand S., Mattsson V. Impact of gaps on resource efficiency in heavy welding industry. URL: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/240909/local_240909.pdf (accessed: 12.12.2024).
- [32] Öberg A.E., Åstrand E. Improved productivity by reduced variation in gas metal arc welding (GMAW). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 1-4, pp. 1027–1038, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0214-4>
- [33] Kasitsyn A.N., Agafonov R.Yu., Leonov A.V. et al. [Control of CRS parameters on the basis of data from the system of scanning the gap between the welded edges in the welding process]. *Elektronno-luchevaya svarka i smezhnye tekhnologii. Mat. Tretyey mezhd. konf.* [Electron beam welding and related technologies. Proc. 3rd Int. Conf.]. Moscow, Izd-vo MEI Publ., 2020, pp. 451–457. EDN: QELEUM (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.04.2025

Информация об авторах

БАБКИН Александр Сергеевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Оборудование и процессы машиностроительных производств». ЛГТУ (398055, Липецк, Российская Федерация, Московская ул., д. 30, e-mail: bas-43@yandex.ru).

БАБКИН Игорь Александрович — руководитель группы. АО «НЛМК-ИНЖИНИРИНГ» (398008, Липецк, Российская Федерация, Калинина ул., д. 1, e-mail: igorb5594@gmail.com).

ТЕРЕХОВ Виктор Викторович — аспирант кафедры «Оборудование и процессы машиностроительных производств». ЛГТУ (398055, Липецк, Российская Федерация, Московская ул., д. 30, e-mail: terekhovvikt@yandex.ru).

Information about the authors

BABKIN Alexander Sergeevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department Equipment and Processes of Machine-building Industries. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 30, e-mail: bas-43@yandex.ru).

BABKIN Igor Alexandrovich — Group Head. NLMK ENGINEERING JSC (398008, Lipetsk, Russian Federation, Kalina St., Bldg. 1, e-mail: igorb5594@gmail.com).

TEREKHOV Viktor Viktorovich — Postgraduate, Department Equipment and Processes of Machine-building industries. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 30, e-mail: terekhovvikt@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бабкин А.С., Бабкин И.А., Терехов В.В. Влияние зазора сварного соединения на его свойства: обзор. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 11, с. 59–71.

Please cite this article in English as:

Babkin A.S., Babkin I.A., Terekhov V.V. The effect of a welding root opening on weld properties: a review. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 11, pp. 59–71.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию

«Применение цифровых технологий промышленной логистики на примере нефтеперерабатывающих заводов»

Авторы: М.Н. Захаров, А.С. Саркисов

Рассмотрены основные вопросы использования цифровых технологий в задачах планирования нефтепереработки. Теоретический материал иллюстрируется примерами, связанными с работой нефтеперерабатывающих заводов.

Для студентов, обучающихся по инженерно-экономическим специальностям, и специалистов, участвующих в планировании капитальных вложений, подготовке финансовых и инвестиционных решений в области топливно-энергетического комплекса.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>