

Р. А. Рзаев¹, Л. М. Гуревич², А. Г. Валишева¹, И. К. Черных³

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКСИАЛЬНОГО УСИЛИЯ
ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ***

¹ Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева

² Волгоградский государственный технический университет

³ Омский государственный технический университет

e-mail: radmir.82@mail.ru

В статье рассматривается прикладываемое усилие к сварочному инструменту при сварке трением с перемешиванием технически чистых меди М1 и алюминия АД1. Представлена методика измерения прикладываемого к инструменту аксиального усилия.

Результаты исследования показывают, что скорость вращения и подачи (сварки) инструмента влияют на величину осевого усилия. При сохранении постоянной скорости подачи инструмента аксиальная сила увеличивается по мере уменьшения скорости его вращения. Максимальное значение усилия составляло 28,75 кН при скорости вращения $\omega = 800$ об/мин. Увеличение частоты вращения инструмента до 900 и 1000 об/мин приводит к уменьшению аксиального усилия на 15 и 40 % от максимального, возникающего при 800 об/мин. При фиксированной частоте вращения инструмента и увеличивающейся скорости сварки изменение аксиального усилия незначительно.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, сварка в твердой фазе, разнородные соединения, алюминий, медь, сверхпластическое состояние, аксиальное усилие.

R. A. Rzaev¹, L. M. Gurevich², A. G. Valisheva¹, I. K. Chernykh³

**INVESTIGATION OF AXIAL FORCE DURING FRICTION
MIXING WELDING OF ALUMINUM AND COPPER.**

¹ Astrakhan State University named after V. N. Tatishcheva

² Volgograd State Technical University

³ Omsk State Technical University

The article considers the force applied to the welding tool during friction stir welding of commercially pure copper M1 and aluminum AD1. A technique for measuring the axial force applied to the tool is presented.

The results of the study show that the speed of rotation and feed (welding) of the tool affect the value of the axial force. While maintaining a constant feed rate of the tool, the axial force increases as the speed of its rotation decreases. The maximum value of the force was 28.75 kN at a rotation speed $\omega = 800$ rpm. Increasing the tool speed to 900 and 1000 rpm leads to a decrease in axial force by 15% and 40% of the maximum that occurs at 800 rpm. At a fixed tool speed and increasing welding speed, the change in axial force is negligible.

Key words: friction stir welding, solid phase welding, dissimilar joints, aluminum, copper, superplastic state, axial force.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это экологически чистая технология соединения металлов и сплавов в твердой фазе. Благодаря ряду преимуществ (низкие остаточные напряжения и деформации, низкие вероятность

трещинообразования и пористости сварного соединения), технология СТП в настоящее время широко используется в аэрокосмической, железнодорожной, судостроительной и автомобильной промышленности [1; 2].

Процесс СТП можно разделить на следующие этапы:

а) стадия вертикального погружения инструмента, на которой он достигает поверхностей свариваемых пластин и проникает в материал до касания заплечиком верхней плоскости листа;

б) стадия проникновения заплечика на 0,1 мм ниже верхней поверхности свариваемых металлов, обеспечивая правильный фрикционный контакт между инструментом и кромками свариваемых пластин (на первой и второй стадиях скорость инструмента поддерживалась постоянной и составляла 5 мм/мин);

в) стадия выдержки, при которой инструмент вращается без вертикального или горизонтального перемещения в месте ввода и размягчает свариваемые металлы за счет фрикционного нагрева;

г) стадия движения, при которой поддерживается постоянная скорость перемещения сварочного инструмента вдоль оси X и вращения относительно оси Z.

При СТП генерация теплоты происходит за счет трения вращающегося заплечика и пина инструмента о поверхность свариваемой заготовки, что приводит к снижению предела текучести свариваемого материала и обеспечивает его пластическую деформацию. Инструмент совершает поступательно-вращательное движение, создавая сложное течение металлов в сварном шве алюминия и меди.

По сравнению с другими параметрами процесса (скорость вращения и сварки, скорость и глубина погружения инструмента в свариваемые материалы), исследования влияния прикладываемого усилия и крутящего момента инструмента на структуру сварного соединения ограничены. Это связано с тем, что большинство машин, используемых для СТП, представляют собой специализированные станки с достаточной жесткостью и грузоподъемностью. В настоящее время, благодаря низкой себестоимости и высокой производственной адаптируемости, промышленные роботы стали недорогим и гибким решением для СТП [3; 4]. Однако жесткость и грузоподъемность сварочных роботов обычно намного меньше, чем у специализированных станков. В этом случае при проектировании роботизированных станков для СТП важны точные знания усилий, прикладываемых к инструменту. Кроме того, знание необходимых усилий на инструмент полезны при

оптимизации параметров сварочного процесса, а также при проектировании сварочных инструментов и зажимов для заготовок. За последние несколько десятилетий были предприняты ряд экспериментальных исследований по определению усилий инструмента вовремя СТП [5–10].

Прикладываемое усилие к инструменту влияет на величину генерируемой тепловой мощности заплечиком и пином инструмента, а, следовательно, на распределение температуры в сварном соединении.

Первоначально СТП была разработана для алюминиевых сплавов, но она также может быть использована для сварки разнородных металлов (алюминиевый и медный сплавы, алюминиевый и титановый сплавы, алюминиевый сплав и сталь) [11–14]. В работах [15–17] продемонстрировано влияние параметров режимов СТП на механические свойства разнородного соединения. На основе исследования микроструктуры ядра сварного шва, зон термомеханического влияния, сформировавшихся при СТП было предположено, что зоны сварных соединений формируются в режиме структурной сверхпластичности и имеют характерную сдвигополосчатую слоистую структуру с чередующимися слоями [18].

Целью настоящей статьи являлось исследование прикладываемого усилия к сварочному инструменту при различных параметрах сварки трением с перемешиванием технически чистых меди М1 и алюминия АД1.

Методика исследования

Сварку выполняли на широкоуниверсальном фрезерном станке 6Т80Ш, оснащенном специальным сварочным инструментом (СИ), изготовленным из вольфрамокобальтового твердого сплава ВК8. Для установки в вертикальный шпиндель фрезерного станка на инструменте выполняли конический хвостовик (конус Морзе №1 ГОСТ 25557–2016), который плавно переходил в цилиндр диаметром 14 мм, выполнявший функцию заплечика. Торец заплечика была выполнен в виде вогнутой поверхности, на оси которой располагался пин, имеющий форму усеченного конуса с диаметрами 2 или 6 мм и длиной по образующей, равной толщине свариваемых деталей. Стыковые сварные соединения сваривали при скорости вращения инструмента от 800 до 1000 об/мин, скорость продольного перемещения стола вдоль кромок закрепленных листов алюминия

АД1 и меди М1 изменяли от 20 до 80 мм/мин.

Для измерения усилия и крутящего момента использовался четырехкомпонентный датчик (рис. 1). Основные измеряемые параметры: сила F_x , действующая в направлении сварки (вдоль шва); сила F_y , действующая перпендикулярно направлению сварки в плоскости, параллельной поверхностям стыкуемых элементов (плоскость сварки); осевая сила F_z , действующая в направлении, перпендикулярном

плоскости сварки, крутящий момент M_z и частота вращения.

По данным [19] аксиальная сила F_z является наибольшей среди трех составляющих усилия на сварочный инструмент (F_x , F_y , F_z). Эта сила является одним из основных факторов, определяющих фрикционное взаимодействие поверхности свариваемых металлов с заплечиком и пином.

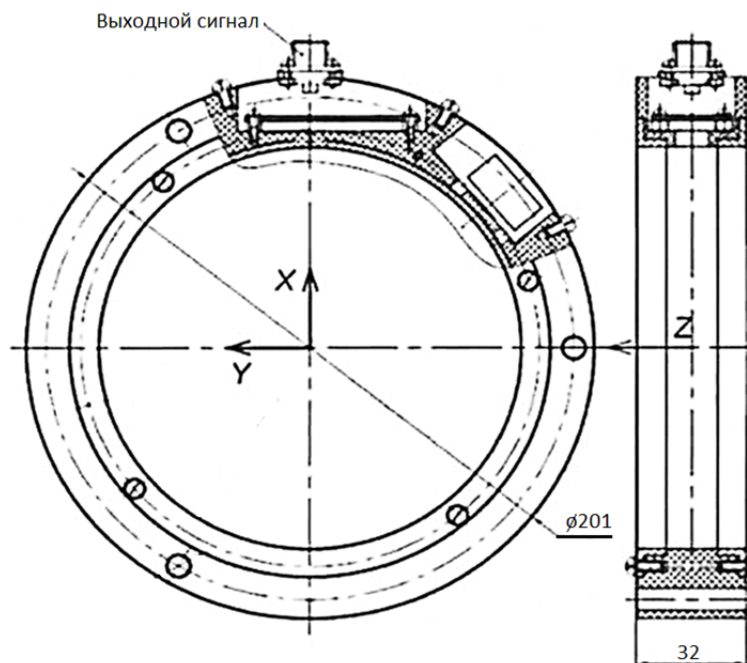


Рис. 1. Четырехкомпонентный датчик составляющих усилия

Четырехкомпонентный датчик устанавливался в вертикальный шпиндель фрезерного станка, используемого для сварки трением с перемешиванием, с помощью конусного хвостовика 50 ГОСТ 25827–2014. Связь между компьютером и датчиком осуществляется посредством интерфейса USB 2.0. Для визуализации и регистрации измеряемых данных сил и крутящего момента на персональный компьютер использовалось программное обеспечение ПРОФИ.

Обсуждение полученных результатов

В процессе исследований процесса СТП варьировали скорость вращения инструмента от 800 до 1000 об/мин при значении скорости сварки от 25 до 63 мм/мин. На рис. 3 представлена зависимость вертикальной составляющей усилия F_z от времени при скорости продольного перемещения инструмента 25 мм/мин по оси X.

Проведенные исследование показали по-

вторяющуюся тенденцию изменения зависимости F_z от времени (рис. 2) при различных параметрах режимов СТП. Величина прикладываемого усилия достигала максимального значения при погружении инструмента в заготовку, когда заплечик достигал заданной глубины. На стадии поступательного движения вдоль оси X значение силы уменьшалось на 20–35 %.

На кривых зависимости усилия от стадии процесса можно выделить два наблюдаемого пика. Первый скачок возникает во время проникновения пина в поверхность заготовки (первая стадия). При вводе пина обнаружена некоторая нестабильность значений усилия. Затем выявляются наличие еще нескольких всплесков на кривой, которые следуют за первым. Нестабильность величины усилия связана с тем, что свариваемый металл еще не достиг температуры перехода в сверхпластическое состояние. При трении поверхности пина по свариваемому образцу генерируется теплота, приводящая

к нагреву и снижению пределов текучести свариваемых металлов. Это приводит к уменьшению вертикальной составляющей усилия F_z . При достижении заплечиком поверхности свариваемых металлов и дальнейшем погружении, вертикальная составляющая усилия вновь уве-

личивается из-за роста площади контакта с деформируемым металлом, добавочной работы силы трения и большего количества металла, задействованного в процессе перемешивания. Значение аксиального усилия на второй стадии больше, чем первичный пик.

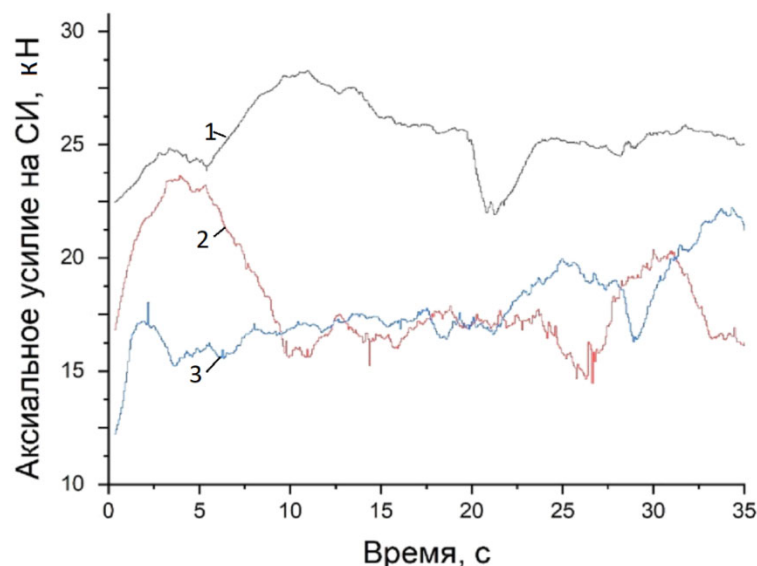


Рис. 2. Зависимость вертикальной составляющей усилия при скорости сварки 25 мм/мин и угле наклона 3° от частоты вращения СИ:
1 – 800 об/мин; 2 – 900 об/мин; 3 – 1000 об/мин

На стадии выдержки сила F_z уменьшается из-за снижения предела текучести свариваемого материала, вызванного фрикционным нагревом. В начале фазы сварки аксиальное усилие вновь начинает быстро расти. При выходе процесса СТП на стационарный режим, вертикальное усилие достигает установившихся значений во время завершающей стадии.

Вертикальная составляющая усилия значительно больше, чем другие составляющие, и поэтому она является ограничивающим фактором при конструировании сварочных машин или роботов. Кроме того, эта сила больше всего влияет на износ и разрушение инструмента. Поэтому разрушение инструмента часто наблюдается во время погружения, когда вертикальная составляющая усилия максимальна.

При постоянной скорости подачи инструмента аксиальная сила увеличивается по мере уменьшения скорости вращения инструмента (рис. 2). Максимальное значение усилия, прикладываемого к инструменту, составляло 28,75 кН при частоте вращения $\omega = 800$ об/мин. Увеличение частоты вращения инструмента до 900 и 1000 об/мин приводило к уменьшению

усилия на 15 % и 40 % от максимальной аксиальной силы, возникающей при 800 об/мин, соответственно. Снижение вызвано более высокой пиковой температурой сварного шва с увеличением тепловложения при росте скорости вращения инструмента, что приводит к снижению предела текучести материала под инструментом, тем самым уменьшая напряжение течения материала и F_z .

Более стабильные значения аксиальной силы наблюдалось при частоте вращения $\omega = 900$ об/мин. Значительные колебания величины усилия F_z на стадии сварки, не характерные для стабильного процесса СТП, наблюдались при 800 и 1000 об/мин. Пики на графике нагрузки свидетельствуют о возможности формирования дефектов шва на поверхности соединения алюминия и меди.

Как обсуждалось ранее, варьирование скоростей движения и вращения инструмента изменяет величину генерируемой тепловой мощности, что оказывает значительное влияние на морфологию поверхности сварного шва и возможность образования периодических дефектов в виде канавок и несплавлений (рис. 3, а, в).

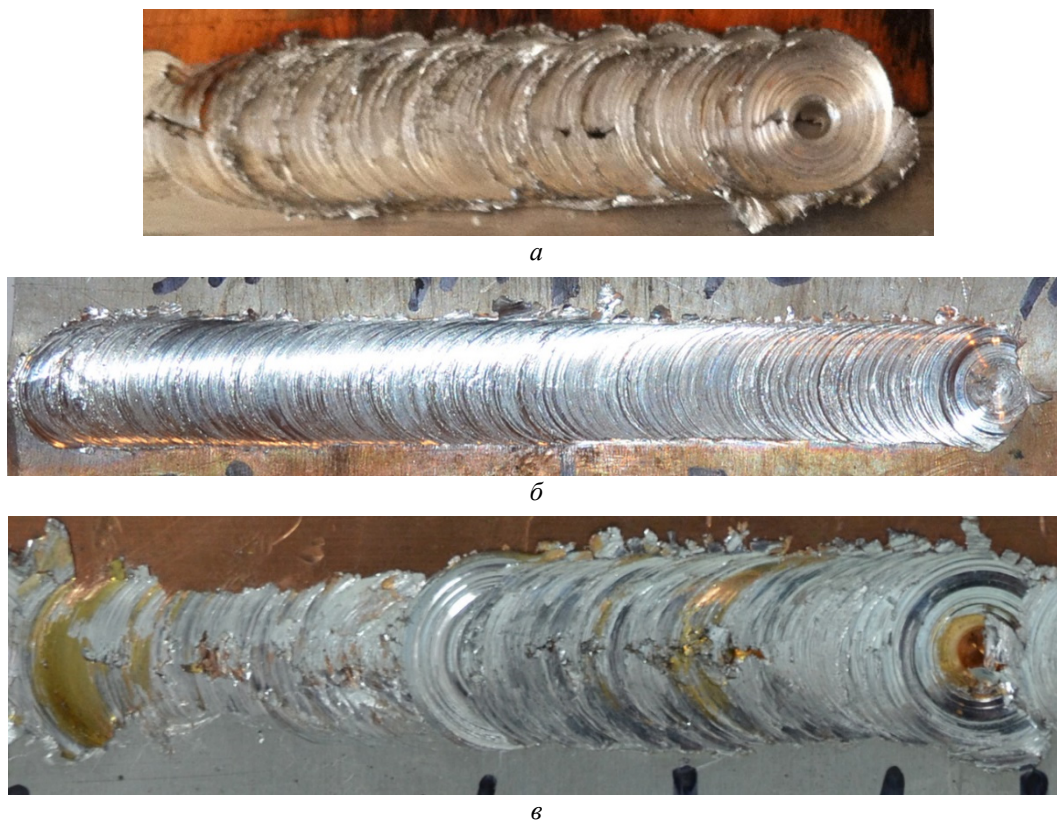


Рис. 3. Морфология сварного шва при скорости сварки 25 мм/мин и угле наклона инструмента 3° от скорости вращения СИ об/мин:
а – 800 об/мин; б – 900 об/мин; в – 1000 об/мин

При скорости вращения инструмента 900 об/мин, для которой зафиксирована стабильная зарегистрированная осевая нагрузка СТП (рис. 2), получена относительно ровная поверхность шва с одинаковой периодичностью чешуек (рис. 3, б). При частоте вращения 900 об/мин для установившегося процесса сварки с бездефектной поверхностью сварного валика (временной интервал от 10 до 35 с) значения вертикальной составляющей усилия оказались более стабильными (рис. 2), чем на участках с дефектами поверхности сварного шва (рис. 3, а, в). Излишний или недостаточный подвод тепла может вызвать туннельные дефекты сварного шва. Режим с частотой вращения 1000 об/мин имел самое высокое отношение скорости вращения к скорости сварки и, соответственно, самое высокое тепловложение, что приводило к формированию поверхности шва с наихудшей морфологией. По линии сварки образовались трещины, а фрагменты алюминия и меди были неравномерно распределены по поверхности сварного шва. График изменения осевой составляющей нагрузки (рис. 2) показывает, что приложенная F_z постепенно увеличивалась в момент возникновения поверхностных и внут-

ренних дефектов. Максимальное значение F_z было намного выше, чем в других бездефектных областях.

Поверхность зоны сварки представляла металл серебристо-белого цвета с желтыми фрагментами меди (или ее сплава), что указывает на перемешивание инструментом алюминия и меди, а также выдавливание на поверхность пластин. По краям области действия инструмента наблюдалось большое количество грата (рис. 3, а, в).

На рис. 4 показано изменение значений F_z , измеренных при СТП с частотой вращения 800 об/мин и тремя скоростями подачи (25 мм/мин, 40 мм/мин, 63 мм/мин) инструмента. Можно заметить циклическую тенденцию изменения прикладываемой нагрузки к сварочному инструменту. Аксиальное усилие возрастает по мере того, как скорость продвижения увеличивается, что связано с хорошо известной тенденцией [21] уменьшения тепловыделения при увеличении скорости подачи инструмента. С уменьшением выделения фрикционной тепловой энергии свариваемый материал не достигает температуры перехода в сверхпластическое состояние. На рис. 5 показано что увеличение скорости сварки оказывает наименьшее

влияние на вертикальную составляющую F_z : осевая нагрузка возросла с 26,5 до 29 кН при увеличении скорости сварки с 25 до 63 мм/мин. Вертикальная составляющая усилия F_z увели-

чивается с ростом шага шва (отношение скорости сварки к частоте вращения инструмента), что хорошо согласуется со значениями F_z , при частоте вращения 900 об/мин (рис. 5).

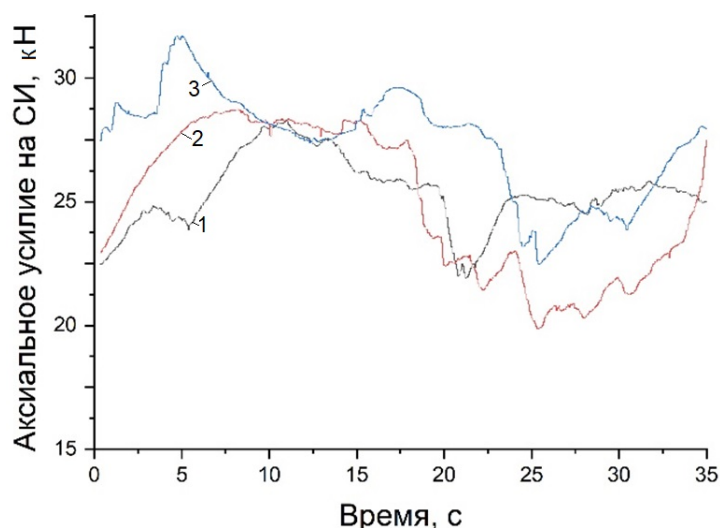


Рис. 4. Зависимость вертикальной составляющей усилия при частоте вращения СИ 800 об/мин и угле наклона 3° от скорости сварки:
1 – 25 мм/мин; 2 – 40 мм/мин; 3 – 63 мм/мин

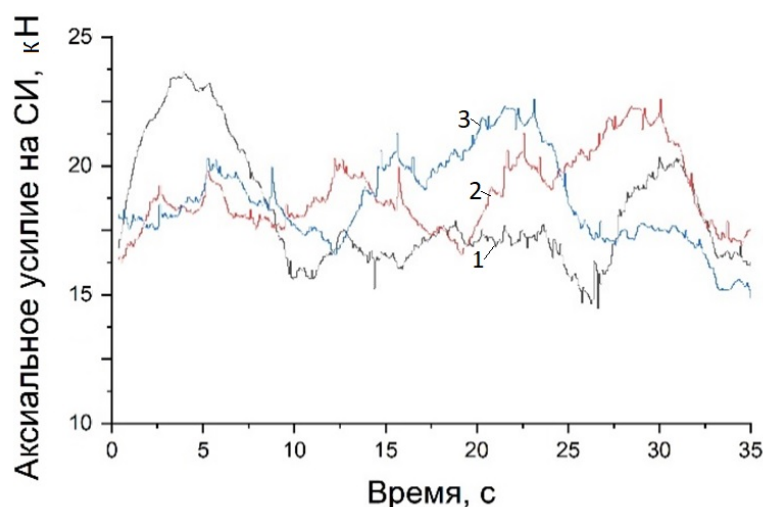


Рис. 5. Зависимость вертикальной составляющей усилия при частоте вращения СИ 900 об/мин и угле наклона 3° от скорости сварки:
1 – 25 мм/мин; 2 – 40 мм/мин; 3 – 63 мм/мин

На рис. 5 представлены значения F_z , измеренные в течение СТП при частоте вращения инструмента 900 об/мин для трех значений скорости подачи (25 мм/мин, 40 мм/мин, 63 мм/мин). Наблюдается описанная выше тенденция изменения нагрузки от времени, с увеличением вертикальной составляющей усилия по мере увеличения скорости подачи инструмента: более высокое значение скорости сварки (63 мм/мин) приводит к увеличению значения F_z . На стабилизированной стадии сварки происходило воз-

растание осевого усилия с 17,5 кН до 22,5 кН при росте скорости сварки от 25 до 63 мм/мин.

Увеличение скорости вращения СИ до 1000 об/мин (рис. 6) сопровождается снижением значения усилия F_z по сравнению с 900 об/мин (рис. 5). При скорости вращения 1000 об/мин и скорости сварки 63 мм/мин осевая сила достигает максимального значения 29,5 кН. Значение нагрузки для скоростей 25 и 40 мм/мин были меньше на 30 и 25 % от наибольшего значения F_z . Причина заключается в том, что плот-

ность теплового потока на единицу длины становится меньше, что приводит к уменьшению погонной энергии. Степень пластификации и текучесть алюминиевого и медного сплавов под заплечиком снижается, а сопротивление деформации металлов увеличивается, что приводит к увеличению осевой силы.

Выводы

1. Результаты исследования показывают, что скорости вращения и сварки инструмента влияют на величину осевой силы при сварке трением с перемешиванием. При сохранении постоянной скорости подачи инструмента вертикальная составляющая усилия F_z увеличивается по мере снижения частоты вращения инструмента. Максимальное значение усилия составляло 28,75 кН при частоте вращения $\omega = 800$ об/мин.

2. Увеличение частоты вращения инструмента до 900 и 1000 об/мин приводит к уменьшению усилия на 15 и 40 % соответственно от максимальной аксиальной силы, возникающей при 800 об/мин. При фиксированной частоте вращения инструмента и увеличивающей скоростью сварки изменение аксиальной силы не значительно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mishra, R.S., Ma, Z.Y. Friction stir welding and processing// Mater. Sci. Eng. R-Rep. -2005. -№50(1-2). - pp. 1-78.
2. Meyghani, B., Wu, C. Progress in thermomechanical analysis of friction stir welding// Chin. J. Mech. Eng. -2020. - №33(1). - pp. 1-33.
3. Yue, W., Liu, H., Huang, T. An approach for predicting stiffness of a 5-DOF hybrid robot for friction stir welding// Mech. Mach. Theory. - 2022. -175. 104941.
4. Guillo, M., Dubourg, L. Impact & improvement of tool deviation in friction stir welding: weld quality & real-time compensation on an industrial robot// Robot Comput-Integr. Manuf. -2016. -№39. -pp. 22-31.
5. Zhao, X., Kalya, P., Landers, R.G., Krishnamurthy, K. Empirical dynamic modeling of friction stir welding processes// J. Manuf. Sci. Eng-Trans. ASME. -2009. -№131(2). - pp. 021001.
6. Astarita, A., Squillace, A., Carrino, L. Experimental study of the forces acting on the tool in the friction-stir welding of AA 2024 T3 sheets// J. Mater. Eng. Perform. -2014. - №23(10). - pp. 3754-3761.
7. D'Orazio, A., Forcellese, A., Simoncini, M. Prediction of the vertical force during FSW of AZ31 magnesium alloy sheets using an artificial neural network-based model// Neural. Comput. Appl. - 2019. -№31(11). - pp. 7211-7226.
8. Kumar, R., Singh, K., Pandey, S. Process forces and heat input as function of process parameters in AA5083 friction stir welds// Trans. Nonferrous. Met. Soc. China. -2012. - №22(2). - pp. 288-298.
9. Das, B., Pal, S., Bag, S. Design and development of force and torque measurement setup for real time monitoring of friction stir welding process// Measurement. -2017. -№103. - pp. 186-198.
10. Mehta, M., Chatterjee, K., De, A. Monitoring torque and traverse force in friction stir welding from input electrical signatures of driving motors// Sci. Technol. Weld. Join. -2013. - №18(3). - pp. 191-197.
11. Kumar, A., Das A., Ballav, R. Influence of interlayer on microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar joints: A review// Materials Today: Proceedings. - 2020. -№26. - pp. 2123-2129.
12. Tanaka, T., Morishige, T., Hirata, T. Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys// Scr. Mater. -2009, -№61, - pp. 756-759.
13. Kar, S.K., Choudhury, S., Suwas, S., Kailas, S.V. Effect of niobium interlayer in dissimilar friction stir welding of aluminum to titanium// Mater. Charact. -2018. - №45. - pp. 402-412.
14. Gotawala, N., Shrivastava A., Analysis of material distribution in dissimilar friction stir welded joints of Al 1050 and copper// Journal of Manufacturing Processes. -2020. -57. - pp. 725-736.
15. Sharma N., Khan Z.A., Siddiquee, A.N. Friction stir welding of aluminum to copper—An overview// Trans. Nonferrous Met. Soc. China. -2017. -№7. -pp. 2113-2136.
16. Esmaeili, H., Besharati, G.M., Zareie, R.H. Experimental investigation of material flow and welding defects in friction stir welding of aluminum to brass [J]// Materials and Manufacturing Processes. - 2012. -№27(12). -pp. 1402-1408.
17. Elmetwally, H.T., SaadAllah, H.N., Abd-Elhady, M.S., Abdel-Magied, R.K. Optimum combination of rotational and welding speeds for welding of Al/Cu-butt joint by friction stir welding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2020. -№110. -pp. 163-175.
18. Пзеев, П. А. Соединение Ti и его сплавов с алюминиевыми сплавами сваркой трением с перемешиванием / П. А. Пзеев, А. А. Чуларис, Н. А. Выборнов // Технология металлов. - 2019. - №. 7. - С. 12-21.
19. Astarita, A., Squillace, A., and Carrino, L. Experimental Study of the Forces Acting on the Tool in the Friction-Stir Welding of AA 2024 T3 Sheets//JMEPEG. -2014. - 23. - pp. 3754-3761.