

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СБОРКЕ

О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов

Введение

Анализ результатов исследований ультразвуковой сборки показывает, что при определенном сочетании параметров ультразвуковых колебаний можно повысить прочность соединений за счет образования мостиков схватывания между поверхностями в сопряжении аналогично тому, как при ультразвуковой сварке. Образующиеся в процессе контактного взаимодействия мостики схватывания существенно повышают функциональные параметры соединения, в частности прочность на сдвиг и на кручение. Общие закономерности, лежащие в основе ультразвуковой сварки и образования мостиков схватывания при ультразвуковой сборке, позволяют рационально использовать явления, сопровождающие эти процессы [1–4].

Анализ факторов, способствующих повышению прочности

Рассматривая механизм образования сварного соединения в твердой фазе, отметим, что поверхность любого, даже тщательно отполированного, твердого тела всегда имеет волнистость и шероховатость. При сближении таких поверхностей их начальное соприкосновение происходит лишь отдельными точками, расположенными на гребнях волнистостей. Контакт поэтому имеет дискретный характер. Обычно различают:

- номинальную площадь соприкосновения, очерченную внешними границами соприкасающихся поверхностей;
- контурную площадь соприкосновения, представляющую собой сумму площадок, расположенных на гребнях волнистостей; по контурной площади происходит объемное смятие при нагружении контактирующих поверхностей, и контакт имеет смешанный упругопластический характер;
- фактическую площадь контакта, представляющую собой совокупность элементарных площадок касания, вошедших во взаимодействие микровыступов.

Несмотря на то, что число одновременно контактирующих микровыступов может быть весьма значительным, суммарная фактическая площадь касания сопряженных поверхностей во много раз меньше номинальной поверхности контакта. Если на ней возникнут силы взаимодействия между сопряженными телами, т.е. если появятся первые очаги схватывания поверхностей и даже если локальная прочность этих очагов будет весьма высокой, то прочность такого соединения в целом окажется намного меньшей, чем прочность исходного материала деталей. Поэтому единичное схватывание следует рассматривать как элементарный процесс, лежащий в основе образования сварного соединения, но последнее можно получить лишь при условии распространения единичных схватываний на всю номинальную поверхность или на большую ее часть [3].

Можно рассматривать процесс образования сварного соединения в твердой фазе как процесс, состоящий из двух стадий, протекающих последовательно во времени:

А. Образование и развитие физического контакта между поверхностями. Когда в результате смятия микровыступов и шероховатостей число мостиков схватывания между поверхностями возрастает, суммарная площадь физического контакта увеличивается, стремясь к своему пределу – номинальной площади;

В. Возникновение между сближенными поверхностями прочных связей, имеющих химическую природу.

Стадии **А** – преимущественному образованию физического контакта свойственно лишь максимальное сближение поверхностей и очищение их от окисных и адсорбированных пленок.

Стадии **В** – свойственно преимущественно образование химических связей, обуславливающих прочность соединения.

В обеих стадиях процесса главную роль играет пластическое деформирование металла, его ползучесть под действием приложенной извне нагрузки и в условиях существующих температур: благодаря ползучести в стадии **A** происходит сближение поверхностей и увеличение площади физического контакта; благодаря ползучести и микродеформированию приповерхностных слоев металла в стадии **B** провоцируется химическая активация металла, выход на поверхность дислокаций и образование на ней активных узлов (мостиков схватывания). Многие авторы отмечают, что разграничение стадий особенно ярко выражено при соединении разноименных материалов, в то время как при соединении одноименных материалов стадии физической подготовки контакта и химической активации соединяемых поверхностей обычно совпадают во времени [3].

Анализ физических особенностей ультразвуковой сборки позволяет говорить о том, что этот процесс обеспечивает выполнение трех условий осуществления сварки в твердой фазе двух тел:

- обязательная очистка сопрягаемых поверхностей от адсорбированных веществ и окисных пленок и обеспечение контакта между чистыми поверхностями;
- максимальное увеличение площади фактического контакта сопряженных поверхностей (в пределе до величины номинального контакта);
- обеспечение пластического течения металла в контакте.

Так, в результате активного ультразвукового воздействия при относительном перемещении деталей в процессе сборки происходит очистка поверхностей от адсорбированных веществ и окисных пленок, создаются условия для контакта ювенильных поверхностей. Увеличение фактической площади контакта и температуры, а также снижение сопротивления пластической деформации создают предпосылки для образования мостиков схватывания [5, 6]. Прочность соединений значительно повышается, когда при достижении втулкой требуемой координаты взаимного положения относительно вала подаются продольные ультразвуковые колебания на обе детали с суммарной амплитудой, достаточной для образования мостиков схватывания в твердой фазе трением поверхностей друг о друга [1]. Отметим, что механизм образования мостиков схватывания в условиях ультразвукового воздействия недостаточно изучен и требует дальнейшего детального изучения. Вместе с тем для реализации предложенного способа с достаточной для практики точностью параметры ультразвуковых колебаний могут быть определены из следующих соображений.

Известно, что мощность тепловыделения при трении определяется зависимостью

$$N = PV, \quad (1)$$

где P – сила, действующая в контакте:

$$P = \mu \pi P_0 dl. \quad (2)$$

Здесь μ – коэффициент трения; l, d – длина и посадочный диаметр втулки, мм; P_0 – удельное давление в контакте, МПа; V – скорость относительного перемещения поверхностей под воздействием ультразвука, м/с:

$$V = 2\pi f\xi. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1) и определяя удельную мощность тепловыделения при трении на единицу контактирующей поверхности $F = \pi dl$, получим

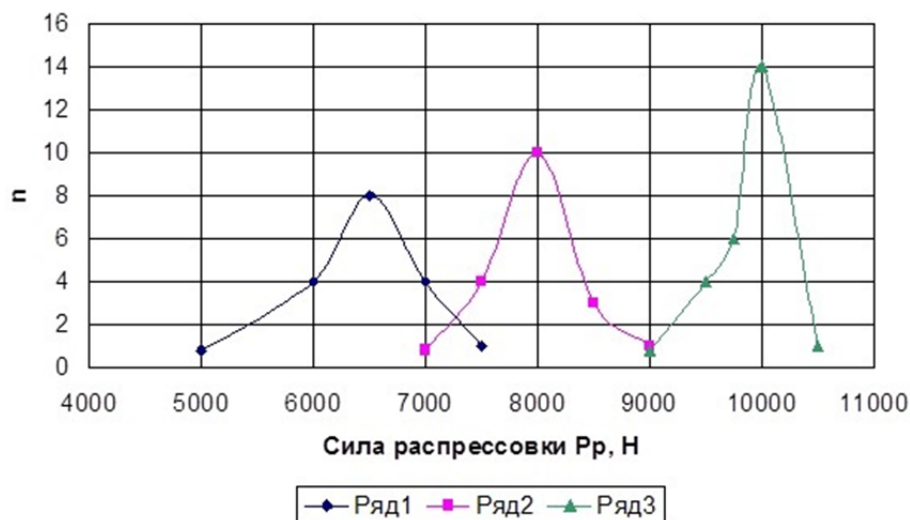
$$[N]_{yd} = 2\pi\mu P_0 f\xi. \quad (4)$$

Отсюда суммарная амплитуда, достаточная для образования мостиков схватывания в твердой фазе трением поверхностей:

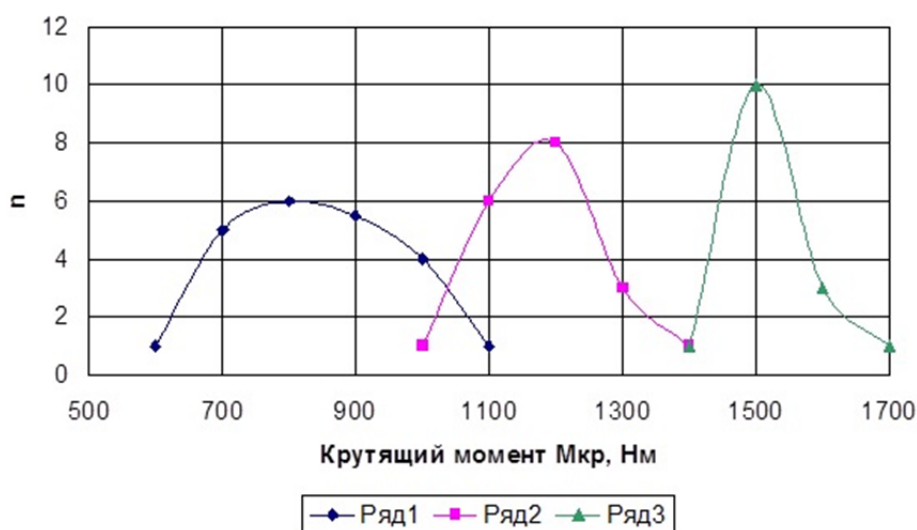
$$\xi = \frac{[N]_{yd}}{2\pi\mu_{yz}P_0f}, \quad (5)$$

где μ_{yz} – коэффициент трения между поверхностями деталей при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями. Для исследуемых фрикционных пар μ_{yz} выбирался индивидуально; $[N]_{yd}$ – необходимая для образования мостиков схватывания удельная мощность тепловыделения. Выбирается для различных пар материалов индивидуально.

На рис. 1 приведены данные распределения прочности соединений на сдвиг и кручение, собранных с различными натягами и амплитудами ультразвуковых колебаний, рассчитанными по зависимости (5). Проведенный анализ данных показывает, что P_p соединений с натягами $\delta = 0,005$ мм и $0,02$ мм отличается между собой не столь значительно, как при сборке без дополнительного воздействия.



а)



б)

Рис. 1. Распределение прочности на сдвиг (а) и кручение (б) в зависимости от натяга и амплитуды УЗК:
 1 – $\delta = 0,005$ мм; $\xi = 30$ мкм; 2 – $\delta = 0,010$ мм; $\xi = 15$ мкм; 3 – $\delta = 0,020$ мм; $\xi = 7$ мкм

При этом повышение прочности соединений в первом случае составило 90 %, а во втором – 54 %. В то же время разброс значений P_p и $M_{кр}$ в партии из 20 шт. при $\delta = 0,020$ мм значительно ниже, чем у соединений, собранных с $\delta = 0,005$ мм, что может быть объяснено разрывом контакта в соединении в связи с изменением диаметральных размеров деталей и происходящим частичным разрушением мостиков схватывания. Данное предположение подтверждено при сборке деталей из сталей 45 и ШХ15СГ, где при $\delta = 0,010$ мм необходимо сообщать деталям колебания с суммарной амплитудой 42 мкм, а при $\delta = 0,020$ мм – $\xi_{\text{сум}} = 21$ мкм.

Проведенными исследованиями было установлено, что время, необходимое для образования мостиков схватывания, составляет от 4 до 6 с (рис. 2). Отметим, что увеличение времени ультразвукового воздействия не оказывает существенного влияния на прочность соединений.

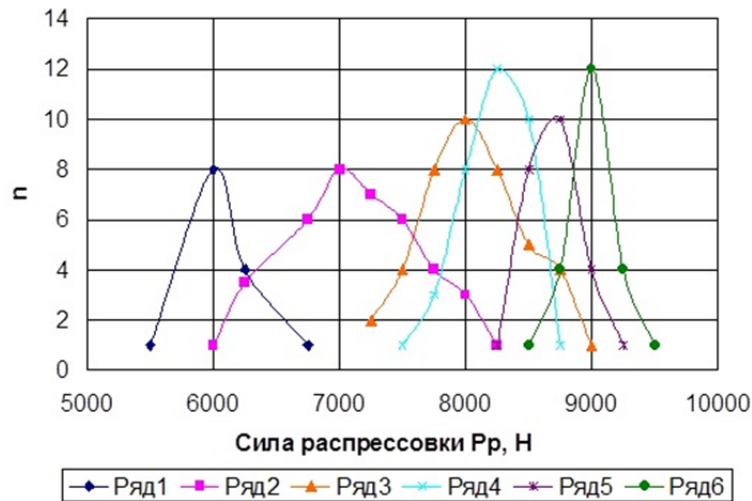


Рис. 2. Распределение прочности на сдвиг при разном времени УЗ воздействия (t):
1 – 0; 2 – 2 с; 3 – 4 с; 4 – 6 с; 5 – 8 с; 6 – 10 с

Рассмотрим влияние ультразвука на характер контактного взаимодействия при сборке. Исследования поведения металлов в контактной зоне соединений проводились на тонких срезах, толщиной 4–5 мм, выполненных перпендикулярно продольной оси. Известны данные, что при сближении поверхностей твердых тел на расстояние порядка 0,1–0,2 мкм возникают молекулярные связи на основе ван-дер-ваальсовых сил притяжения. В связи с этим под схватыванием в соединении с натягом понимают те области контакта, ширина контактных линий которых не более 0,1–0,2 мкм. Все остальные участки контактной зоны относят к зазору.

Также были выполнены металлографические исследования и измерение микротвердости. Изучалась полная длина контактной зоны на различных участках диаметральных сечений соединений при кратности увеличения от 100 до 1000, определяя при этом величину зоны пластической деформации, наличие зон схватывания и плотного контакта. Оценка соединений производилась

по суммарной длине зон схватывания и плотного контакта $\sum_{i=1}^{\pi d} l_{ic}$ и зазоров $\sum_{i=1}^{\pi d} l_{iz}$ на всей длине

окружности (здесь l_{ic} – длина i -й зоны схватывания и плотного контакта; l_{iz} – длина i -й зоны зазора). Графическая обработка результатов измерений позволила установить зависимость суммарной длины зон схватывания и плотного контакта в соединениях с натягом от величины p контактного давления (рис. 3).

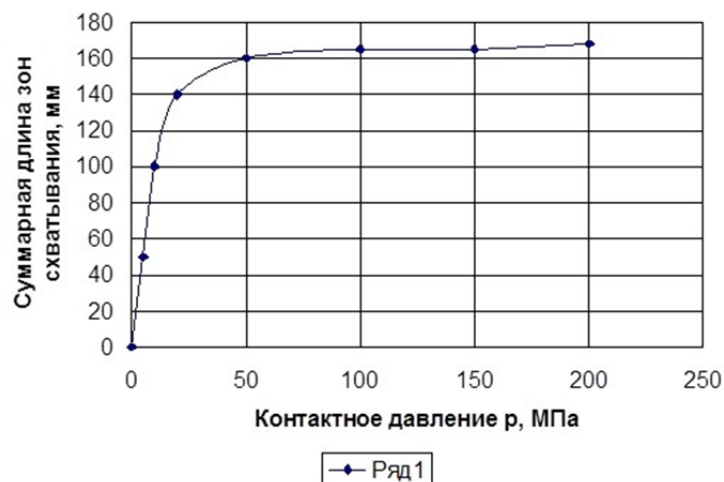


Рис. 3. Зависимость суммарной длины зон плотного контакта и схватывания $\sum_{i=1}^{\pi d} l_{ic}$
от величины p контактного давления

Физическую сущность явлений, протекающих в контактной зоне, можно объяснить с помощью кривой зависимости ширины Δ_T зоны пластически деформированного металла от величины p контактного давления (рис. 4). Полученная посредством измерения микротвердости кривая состоит из трех участков.

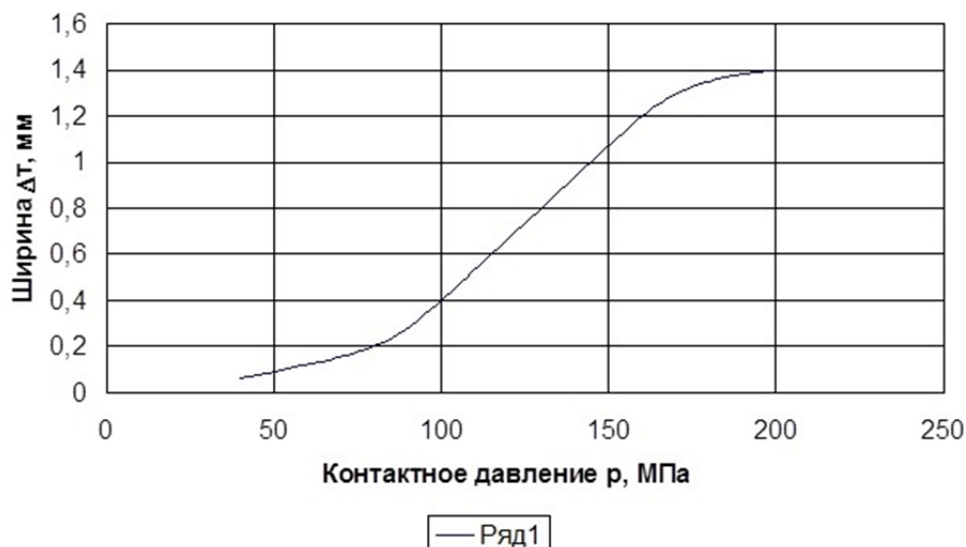


Рис. 4. Зависимость ширины Δ_T зоны пластически деформированного металла в соединениях с натягом от величины p контактного давления

Первый участок характеризует процесс контактирования в диапазоне $20 \leq p \leq 80$ МПа, где происходит упругопластическая деформация поверхностных слоев контактирующих деталей. При этом образуются зоны плотного контакта и частично зоны схватывания. Второй участок, отображающий процесс контактирования в диапазоне $80 \leq p \leq 160$ МПа, характеризуется интенсивной пластической деформацией микронеровностей и образованием основного количества зон схватывания. На третьем участке при $p \geq 160$ МПа в контакт вступает уже волнистость, которая деформируется упруго. Формирование фактической площади контакта здесь происходит за счет образования зон плотного контакта.

Анализ результатов исследований на рис. 3 и 4 показывает, что наибольшая пластическая деформация поверхностных слоев контактирующих деталей происходит в диапазоне $80 \leq p \leq 160$ МПа. При этом возникает наибольшее число зон схватывания и образуется наибольшая фактическая площадь контакта.

Таким образом, можно сделать вывод, что повышение прочности соединений за счет «мостиков схватывания» может быть гарантировано в диапазоне $80 \leq p \leq 160$ МПа.

Заключение

Установлено, что при определенном сочетании параметров ультразвуковых колебаний можно повысить прочность соединений за счет образования мостиков схватывания между поверхностями в сопряжении аналогично тому, как это осуществляется при ультразвуковой сварке.

Библиографический список

1. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбаров. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Блехман, И. И. О теории схватывания металлов / И. И. Блехман // Теория трения и износа. – М. : Наука, 1965. – С. 58–61.
4. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. – М. : Машиностроение, 1980. – 237 с.

5. Батищева, О. М. К проблеме технологического обеспечения надежности и качества сборки машин / О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 3 (11). – С. 65–68.
6. Батищева, О. М. Исследование теплофизической ситуации в зонах контакта при ультразвуковой сборке / О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 132–133.

Батищева Оксана Михайловна

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный технический университет
(443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: omb@list.ru

Папшев Валерий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный технический университет
(443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: pva_samara@mail.ru

Родимов Геннадий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра транспортных процессов
и технологических комплексов,
Самарский государственный технический университет
(443100, Россия, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: rgasamara@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Анализ технологических методов повышения качества соединений при ультразвуковой сборке показывает, что при определенном сочетании параметров ультразвуковых колебаний можно повысить прочность соединений. В этой связи в статье рассматриваются вопросы выявления факторов, способствующих повышению прочности соединений. *Материалы и методы.* На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований реализован комплекс технических решений и практических рекомендаций, направленных на повышение эффективности процесса ультразвуковой сборки. *Результаты.* Определены оптимальные параметры ультразвуковых колебаний, при которых достигается максимальная прочность на сдвиг и кручение. Результаты представлены в виде графиков. *Выводы.* Установлена возможность повышения прочности и функциональных параметров соединений за счет образования в зоне контакта мостиков схватывания между поверхностями в процессе сборки.

Ключевые слова: поверхности сопряжения, прочность, ультразвуковая сварка.

Batishcheva Oksana Mikhaylovna

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of transport processes
and technological complexes,
Samara State Technical University
(443100, 244 Molodogvardeiskaja street,
Samara, Russia)

Papshev Valeriy Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of transport processes
and technological complexes,
Samara State Technical University
(443100, 244 Molodogvardeiskaja street,
Samara, Russia)

Rodimov Gennadiy Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of transport processes
and technological complexes,
Samara State Technical University
(443100, 244 Molodogvardeiskaja street,
Samara, Russia)

Abstract. *Background.* The analysis of technological methods to improve joint quality during ultrasonic assembly shows that one can improve joint durability by combining a certain parameters of ultrasonic vibrations. In this regard, the article deals with the identification of factors conducive to increase joint durability. *Materials and methods.* Based on the theoretical and experimental researches, a system of technical solutions and practical recommendations aimed at improving the efficiency of the ultrasonic assembly process have been implemented. *Results.* Optimal parameters of ultrasonic vibrations have been determined. Their application gives the maximum joint durability for shear and torsion. The results are shown as graphs. *Conclusions.* The possibility to increase the durability and functional parameters of joints, due to formation of welding bridges between the surfaces in a zone of contact during the assembly, is determined.

Key words: joining surfaces, durability, ultrasonic welding.

УДК 621.787

Батищева, О. М.

Повышение прочности соединений при ультразвуковой сборке / О. М. Батищева, В. А. Папшев, Г. А. Родимов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 61–67. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-9.