

УДК 621.757(088.8)
DOI: 10.12737/20140

И.В. Малкина, старший преподаватель
(Самарский государственный технический университет,
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: Malkina_dom@mail.ru

Повышение качества сборочных соединений объектов машиностроения путём наложения ультразвуковых колебаний

Целью настоящей работы является повышение качества сборки клепаных соединений путем применения ультразвука на базе теоретических и экспериментальных исследований физического механизма процесса и его технологических показателей. Проведен анализ влияния ультразвука на процесс пластической деформации материалов при обработке клепаных соединений. Рассмотрены возможности повышения качества сборочных соединений.

Ключевые слова: амплитуда колебаний; диаграмма сжатия; ультразвуковые колебания; пластическая деформация; клепаные соединения; контактные поверхности; резонансный режим.

I.V. Malkina, Senior Lecturer
(Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya Str, Samara)

Quality increase in assembly joints of mechanical engineering objects by ultrasonic vibrations superposition

This paper reports the problem of quality increase in the assembly of riveted connections. The basic methods for the creation of permanent connections are considered, the computation procedures for durability are analyzed, advantages and disadvantages of hot and cold riveting are revealed. A basic part of the paper deals with of common assembly processes updating. In particular, to the introduction of ultrasonic vibrations in the area of a contact of parts surfaces when together with basic motions envisaged by a technological scheme of assembly the vibrations of ultrasonic frequency are imparted to the parts additionally.

The author shows the main positive results obtained due to the introduction of an ultrasonic method of product processing: the improvement of a surface layer quality in a product, increase of fatigue resistance, contact endurance, contact rigidity and machine parts and tool wear resistance.

In the experimental part there are considered three different procedures of USC feed in the area of rivet head formation. The diagrams of value changes in static efforts of rivet material deformation caused by oscillation amplitude of the end of a thickener are shown.

Keywords: accuracy amplitude of oscillations; diagram of compression; ultrasonic oscillations; plastic deformation; riveted joints; contact surfaces; resonant mode.

Научно-технический прогресс в машиностроении неразрывно связан с постоянным совершенствованием технологии механической обработки и сборки, определяющих в большинстве случаев трудоемкость и качество выпускаемой продукции.

Функциональные параметры машины и трудоемкость сборки во многом зависят от выбранных методов достижения требуемого качества сборочных единиц. Сложный харак-

тер процессов, протекающих при сборке машин предопределяет дифференцированный подход к решению технологических задач достижения точности пространственных, геометрических и физико-химических связей деталей в соединениях, определяемых, в частности, макро- и микроотклонениями, волнистостью, остаточными напряжениями и деформационным упрочнением.

Перспективным направлением совершенст-

вования традиционных процессов сборки является введение ультразвуковых колебаний в зону контакта поверхностей деталей, когда наряду с основными движениями, предусмотренными технологической схемой сборки, деталям дополнительно сообщаются колебания ультразвуковой частоты. Вместе с тем, несмотря на широкое распространение при механической обработке, обработке давлением, очистке, применение ультразвука в сборочных процессах носит ограниченный характер и используется, главным образом, при резьбовых соединениях и соединениях сваркой и пайкой.

Заклепки используются в массовых узлах, где сопрягаются плохо свариваемые друг с другом материалы, в соединениях деталей из разнородных металлов (сталь – цветные сплавы и т.д.). Применяют в соединениях, где необходимо исключить сопутствующее сварке термическое воздействие, выражающееся в ухудшении структуры металла в области сварного шва, перегреве расположенных вблизи сварного соединения деталей и короблении изделий. В соединениях металлических изделий с неметаллическими материалами (дерево, кожа, текстильные материалы, пластики, не поддающиеся креплению опрессовкой, приклеиванием и т.д.)

До сих пор применяют заклепочные соединения в конструкциях, для которых методы сварки и склеивания еще недостаточно разработаны или малоэффективны, а также в соединениях, работающих при больших вибрационных или ударных нагрузках. Заклепки до сих пор являются основными деталями соединений в облегченных ферменных и тонколистовых оболочковых конструкциях из легких сплавов (особенно в самолетостроении). Заклепочные соединения находят свое применение в подъемно-транспортных машинах, в строительстве железнодорожных мостов, котлостроении и т.п.

В современных машинах многие узлы, подверженные большим динамическим нагрузкам, имеют преимущественно заклепочные соединения.

Данные соединения имеют ряд недостатков по сравнению с другими видами неразъемных соединений: сравнительно высокая стоимость и трудоемкость получения заклепочного соединения; невозможность соединений деталей сложной конфигурации; повышенный расход материала для этого соединения (из-за ослабления соединяемых деталей отверстиями под заклепки требуется увеличение их толщины, необходимость применения накладок и т.п.).

Но также обладают и рядом преимуществ: высокая прочность, надежность соединения; удобство контроля качества клепки; повышенная сопротивляемость ударным и вибрационным нагрузкам; возможность соединения деталей из трудносвариваемых металлов.

При создании данного вида неразъемных соединений возможно горячее и холодное заклепывание. Горячая клепка – один из способов повысить качество соединения.

При расчете горячих заклепочных соединений следует исходить из величины осевой нагрузки N , развиваемой заклепкой при усадке, и силы трения $P = Nf$, на стыке. Осевая сила

$$N = \sigma F,$$

где F – площадь поперечного сечения заклепки; σ – растягивающее напряжение, возникающее в заклепке в конце усадки:

$$\sigma = E\alpha(t_1 - t_0),$$

где E и σ – соответственно модуль нормальной упругости и коэффициент линейного расширения материала заклепки; t_1 – температура, при которой прекращается пластическое течение материала заклепки и начинается упругая вытяжка стержня заклепки; t_0 – конечная температура охлаждения.

В начальной стадии остывания, когда металл находится в пластичном состоянии, стержень заклепки вытягивается, в результате чего уменьшается его диаметр. С понижением температуры материал заклепки постепенно упрочняется и начинает оказывать сопротивление усадке. Окончательная стягивающая сила определяется сжатием заклепки за период остывания с температуры, при которой пластические деформации материала сменяются упругими деформациями, до температуры полного остывания. Это же сжатие определяет растягивающие напряжения в стержне заклепки.

Трудность расчета состоит в том, что входящие в уравнение величины переменны. Величины E и σ зависят от температуры, а температура t_1 не определена вследствие растянутости периода перехода пластических деформаций в упругие. Также расчет осложняется из-за неодинакового нагрева заклепок и неравномерного температурного поля по оси заклепок.

Принятая в настоящее время схема расчета заклепочных соединений на срез стержней заклепок, смятие стенок отверстия и поверхности стержней действием поперечной силы не согласуется с действительными условиями

работы заклепочных соединений. Заклепки начинают работать на срез только после того, как произойдет сдвиг сопрягаемых деталей на зазор между стержнем заклепки и стенками отверстия, т.е. когда уже нарушена работоспособность заклепочного соединения.

Схема чистого сдвига на практике встречается достаточно редко. В большинстве случаев заклепочные соединения подвергаются дополнительным напряжениям, изгибу или растяжению, возникающим в результате деформации узла под действием внешних сил (рис.1).

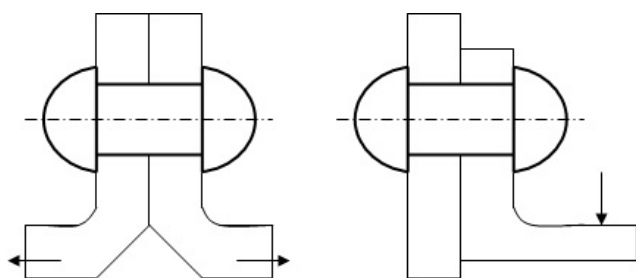


Рис. 1. Действие на растяжение и изгиб

При холодном клепании усадка заклепки происходит только в результате пластической деформации материала заклепки при расклепывании. Осевая сила, стягивающая соединяемые детали, меньше и зависит от степени пластической деформации заклепки, которая может колебаться и имеет более или менее постоянную величину только при машинном клепании, например гидравлическом.

В противоположность горячеклепаным соединениям прочность определяется главным образом сопротивлением заклепок срезу. Силы трения на стыке способствуют разгрузке заклепок от среза и смятия. Однако и здесь существуют трудно учитываемые факторы (например, прилагаемая к заклепке сила и степень пластической деформации, определяющая плотность прилегания заклепки к стенкам отверстия). Допускаемые напряжения принимают равными пределу прочности материала заклепок на срез и смятие с коэффициентом запаса 3 – 4. Кроме того, учитывают метод обработки отверстия.

При использовании холодной клепки благоприятное влияние на прочность соединения оказывает нагартовка заклепки силой расклепывания, сопровождающаяся упрочнением материала заклепки.

В машиностроении применяют преимущественно холодное клепание, так как главный смысл применения заклепочных соединений

состоит в устранении теплового воздействия и получении прочных соединений деталей без нарушения точности их размеров и взаимного расположения.

Однако в соединениях, работающих при высоких температурах, холодное клепание нецелесообразно, так как высокие температуры снимают нагартовку и уменьшают силу стяжки [1].

Эксплуатационные характеристики неразъемных соединений определяются функциональными параметрами качества поверхностного слоя и точности обработки, каждый из которых, в зависимости от конкретных условий эксплуатации изделия, может выступать как параметр оптимизации. Например, для деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, основным параметром оптимизации являются остаточные напряжения, оказывающие решающее влияние на предел выносливости.

Эксплуатационные характеристики изделия непосредственно связаны с его надежностью и долговечностью и, в частности, с такими показателями, как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, наработка на отказ и др.

Один из положительных эффектов, получаемый при введении ультразвука в зону обработки – это значительное снижение сил резания, что отражает общую закономерность воздействия ультразвука на процессы пластического формообразования. Анализ результатов исследований показывает, что независимо от состава и исходных механических свойств металлов при ультразвуковом нагружении происходит снижение условного предела текучести в 3,5...4 раза и коэффициента трения в 2...4 раза.

Введение ультразвуковых колебаний является эффективным средством направленного регулирования основных показателей качества поверхностного слоя, в том числе тонкой кристаллической структуры, деформационного упрочнения и остаточных напряжений. Применение ультразвуковых методов обработки сопровождается значительным повышением усталостной прочности, контактной выносливости, контактной жесткости и износостойкости деталей машин и инструмента.

Использование эффекта снижения сопротивления пластической деформации материалов, при ультразвуковом осаивании материалов, нашло применение в клепаных соединениях деталей. При одном и том же усилии сжатия материалов наложение ультразвуковых колебаний позволяет получать большую

абсолютную деформацию, чем при обычном нагружении, а эквивалентные деформации достигаются при значительно меньших усилиях деформирования.

Возникающие в акустической системе колебания являются упругими и описываются математическим выражением:

$$A = A_m \sin 2\pi ft,$$

где A – смещение в данном элементе системы в момент времени t ; A_m – максимальное значение смещения; f – частота колебаний.

Рассматривая формируемую головку заклепки как присоединённую к инструменту массу, можно определить силу, действующую на эту массу:

$$F = m \frac{d^2 A}{dt^2} = -F_M \sin 2\pi ft,$$

где F_M – максимальное значение силы.

Длина стержня заклепки, формируемого в головку, равна $1,5 d$ (d – диаметр заклепки). Значение силы, действующей на заклепку, вычисляется по формуле

$$F_M = 4\pi^2 f^2 A_m \frac{eV}{g},$$

где V – объём формируемой части заклепки; g – ускорение свободного падения; e – удельный вес материала заклепки [2].

Для реальных значений приведенных величин $F_M = 340eD^3$, где D – диаметр заклепки.

Расчёты показывают, что усилие воздействия торца концентратора на заклепку приблизительно в 400 раз меньше усилия, необходимого для деформирования, следовательно, такое механическое воздействие не может существенно снизить усилие при клепке. Усилие воздействия концентратора на заклепку может быть существенно увеличено за счет введения между концентратором и заклепкой промежуточного элемента с массой M . Для получения требуемого усилия его размеры могут быть определены из формулы

$$e_1 d^2 H = \frac{F_0}{226},$$

где e_1 – удельный вес промежуточного звена (пуансона); d – диаметр пуансона; H – высота пуансона; $F_д$ – сила, необходимая для деформирования заклепки.

Экспериментальная работа проводилась на специально разработанной установке с частотой колебаний 18 кГц и акустической мощностью 1кВт. Данная установка предназначена для формирования головок из стали, меди и

алюминиевых сплавов, а также для запрессовки деталей.

Испытывались три схемы подведения ультразвуковых колебаний в зону формирования головок заклепок (рис. 2): *а* – с опорой головки заклепки на массивный опорный элемент; *б* – с наличием акустической развязки; *в* – с подведением колебаний через промежуточный элемент, не имеющий жесткой связи с концентратором.

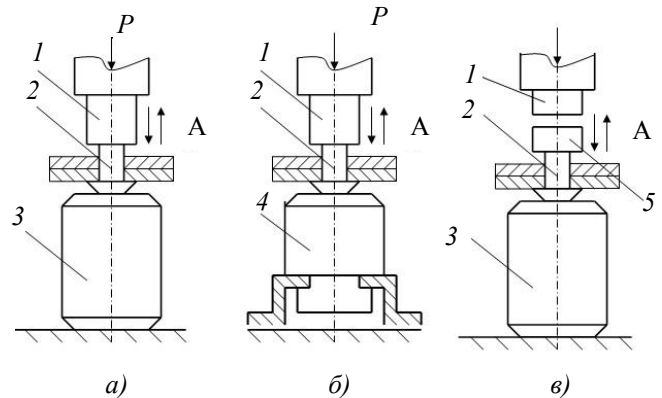


Рис. 2. Схемы подведения УЗК в зону деформирования:

1 – концентратор ультразвукового преобразователя; 2 – заклепка; 3 – массивный опорный элемент; 4 – опорный волновод акустической развязки; 5 – промежуточный элемент

Результаты испытаний для схем рис. 2, *а*, *б* представлены на диаграмме (рис. 3). Приведена зависимость статического усилия деформации P от амплитуды колебаний торца концентратора A . Диаметр исследуемых заклепок – 3 мм.

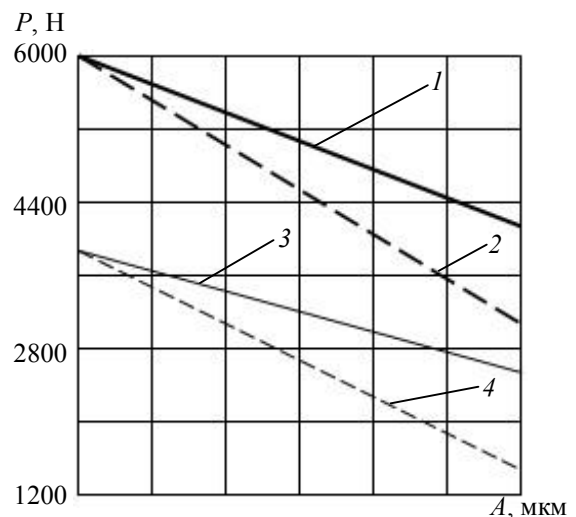


Рис. 3. Зависимость статического усилия деформирования P от амплитуды колебаний торца концентратора A :

1 – сталь 20; 2 – с акустической развязкой; 3 – опора на массивный элемент; 4 – сплав Д1

С увеличением амплитуды колебаний статическое усилие заклепки уменьшается, что соответствует полученным расчётным данным. Наличие акустической развязки увеличивает эффективность процесса, так как возрастание нагрузки не вызывает столь резкого уменьшения величины A . Степень снижения P объясняется не столько динамическим воздействием ультразвука, сколько изменением прочности и пластичности материала в ультразвуковом поле. Данные, характеризующие влияние величины A от усилия P для схемы с промежуточным элементом (рис. 2, в), приведены в табл. 1.

1. Зависимость статического усилия деформирования материала заклепки от амплитуды УЗК

Материал заклепок	Амплитуда колебаний волновода A , мкм			
	10	15	20	30
	Статическое усилие P , Н			
Сплав Д1	80	60	80	100
Ст 20	90	80	90	120

Сравнение приведенных данных с результатами рис. 3. позволяет сделать вывод, что эта схема подведения колебаний к заклепке значительно эффективнее. По сравнению с клепкой без ультразвука ($A = 0$) усилие пресования уменьшается в 75...100 раз, что связано с увеличением в несколько раз амплитуды колебаний пуансона по сравнению с амплитудой концентратора A . Сила P при увеличении A изменяется незначительно, так как оно определяется колебательным режимом пуансона, совершающего упругие колебания между торцом концентратора и стержнем заклепки. При увеличении A время формирования головок заклепок резко уменьшается. Оно составляет для заклепок из сплава Д1: $A = 10$ мкм – 44 с; $A = 20$ мкм – 7...10 с; $A = 30$ мкм – 0,5...1,0 с [3 – 5].

Диаграмма связи оптимальной статической нагрузки с размерами пуансона представлена на рис. 4. Зависимости получены для пуансонов различной длины при неизменном диаметре 25 мм.

Анализ диаграммы показывает, что с увеличением длины пуансона оптимальная статическая нагрузка возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением массы пуансона сопротивление нагрузки возрастает и требуется увеличение подводимой к пуансону мощности.

Влияние статической нагрузки на процесс формирования головок заклепок промежуточным пуансоном изучалось на заклепках из стали 20 и сплава Д1. Определялась зависимость времени формирования головок от статической нагрузки. Результаты, полученные для заклепок диаметром 3 мм, представлены на рис. 5.

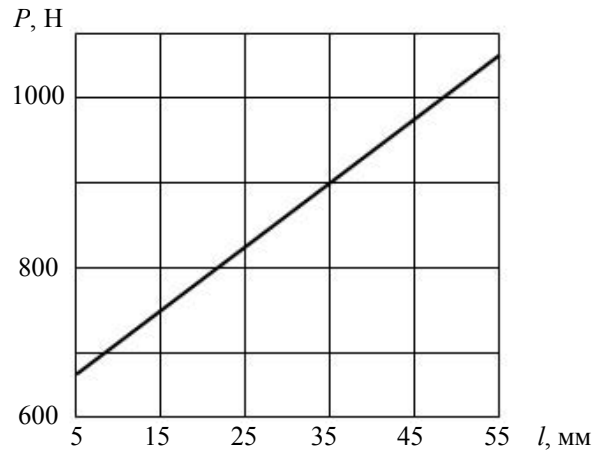


Рис. 4. Зависимость оптимальной статической нагрузки P от длины пуансона l

Экспериментально установлено, что для заклепок диаметром 1...6 мм характер ее не меняется. Оптимальной во всех случаях является статическая нагрузка 350...400 Н.

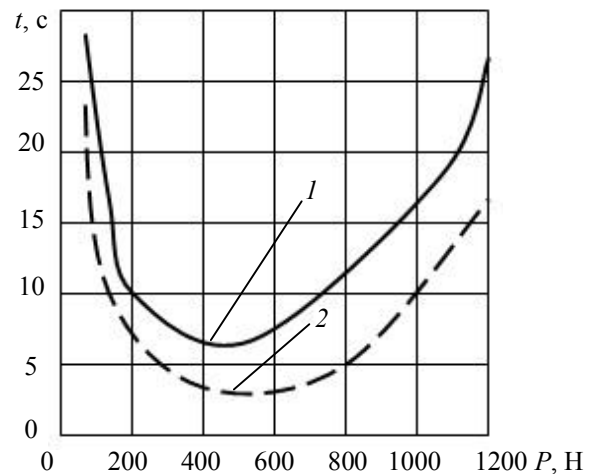


Рис. 5. Зависимость времени формирования головок t от статической нагрузки P :

1 – сталь 20; 2 – сплав Д1

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы об эффективности применения ультразвуковой клепки.

1. Ультразвуковая клепка позволяет осуществлять формирование нормальных головок практически без поперечной деформации стержня, что весьма важно при расклепыва-

нии подвижных соединений. Это обусловлено тем, что при использовании малых амплитуд УЗК экспериментальные образцы деформируются с образованием выпуклой бочки, кривизна образующей которой меньше, чем при обычном нагружении.

2. Большое преимущество ультразвукового метода склеивания наблюдается при соединении материалов с большой разницей в прочности (металлов с пластмассой, деревом, волокнистыми материалами и т.д.). Например, соединение пластин из оргстекла и стали, что невозможно при прессовой и ударной клепке, так как пластины из оргстекла разрушаются.

3. Происходит увеличение прочности на срез и смятие заклепок. Результаты испытаний (табл. 2) показали, что ультразвуковая клепка обеспечивает прочность соединений несколько большую (приблизительно на 10 %), чем прессовая клепка. Характер разрушения заклепок в обоих случаях одинаков – смятие при растягивающей нагрузке.

2. Прочностные характеристики клепаных соединений

Диаметр заклепок, мм	Способ расклепывания	
	прессовый	ультразвуковой
2,0	280	311
3,0	480	526

4. Введение ультразвуковых колебаний малой амплитуды приводит к снижению сопротивления пластическому деформированию, снижает усилие при деформировании в 75...100 раз, а также улучшает эксплуатационные свойства соединений.

5. Ультразвуковые колебания снижают усилие запрессовки приблизительно в 1,5 раза, что немаловажно при формировании головок стержней с малой продольной жесткостью, а

также при соединении малоэластичных ажурных элементов конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ордов П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 1 / отв. ред. П.Н. Усачев. М: Машиностроение, 1988. 543 с.
2. Нерубай М.С., Калашников В.В., Штриков Б.Л., Яреско С.И. Физико-химические методы обработки и сборки: монография. М.: Машиностроение-1, 2005. 395 с.
3. Шапошников С.Д., Малкина И.В. Применение ультразвука для повышения эффективности обработки и сборки клепаных соединений деталей // Известия Самарского научного центра академии наук. 2013. С. 587–589.
4. Малкина И.В. Пластическое деформирование материалов с применением ультразвуковых колебаний // Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени. 2015. № 3(8). С. 82–85.
5. Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Инновационные технологии ультразвуковой обработки // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 7(37). С. 15–20.

REFERENCES

1. Ordov P.I. *Design Fundamentals: reference-methodical manual*. In 2 books. Book 1 / Responsible editor P.N. Usachyov. M: Mechanical Engineering, 1988. pp. 543.
2. Nerubay M.S., Kalashnikov V.V., Strikov B.L., Yaresko S.I. *Physical –Chemical Methods of Processing and Assembly*: Monograph. M.: Mechanical Engineering-1, 2005. pp.395.
3. Shaposhnikov S.D., Malkina I.V. Ultrasound application for efficiency increase in part riveted joints processing // *Proceedings of Samara Scientific Center of Academy of Sciences*. 2013. pp. 587–589.
4. Malkina I.V. Plastic deformation of materials with application of ultrasonic oscillations // *Home Science in Epoch of Changes: Postulates of Past and Theories of New Times*. 2015. № 3(8). pp. 82–85.
5. Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Innovation technologies of ultrasonic processing // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. 2014. № 7(37). pp. 15–20.

Рецензент д.т.н. Д.С. Фатюхин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 08.04.2016. Подписано в печать 11.06.2016.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7