

Машиностроение

УДК 621.757:62-752

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С АНАЛИЗОМ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК¹

Д.В. Анкудинов, О.М. Батищева, В.А. Папшев, В.Г. Шуваев

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Представлен анализ процессов, происходящих в условиях наложения ультразвуковых колебаний малой амплитуды при запрессовке. На основании результатов выполненных экспериментов выделены факторы, влияющие на прочность образуемого соединения.

Ключевые слова: запрессовка, ультразвуковые колебания, узлы схватывания, качество соединений.

Эффективность использования ультразвуковых колебаний малой амплитуды при формировании соединений с натягом во многом объясняется возможностью более прочного соединения разнородных металлов и сплавов между собой за счет изменения характера протекания адгезионных и диффузионных процессов под воздействием ультразвукового поля. Одним из достоинств введения ультразвуковых колебаний малой амплитуды в зону сборки является возможность соединения металлов и сплавов в твердой фазе аналогично тому, как это происходит в процессах ультразвуковой сварки.

В процессе сборки деталей, соединяемых с натягом в результате силового взаимодействия, возникают деформации деталей, искажаются поверхности контактирования, появляются нежелательные напряжения, что, в конечном итоге, приводит к снижению динамического качества соединения. Известно, что вибрационные воздействия улучшают технологический процесс сборки (происходит взаимная ориентация осей собираемых деталей, снижается усилие запрессовки), однако влияние колебаний на напряженно-деформированное состояние деталей требует дополнительных исследований, поскольку напряженно-деформированное состояние в значительной степени определяет прочность соединения. Действующие напряжения в контакте соединяемых поверхностей определяются в соответствии с критерием пластичности Мизеса по следующему соотношению:

$$(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2k^2,$$

¹ Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта №14.740.11.0984.

Дмитрий Викторович Анкудинов – ассистент.

Оксана Михайловна Батищева – к.т.н., доцент.

Валерий Александрович Папшев – к.т.н., доцент.

Вячеслав Георгиевич Шуваев – к.т.н., доцент.

где $\sigma_x, \dots, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений;

k – предел текучести при одноосном сжатии.

Несущую способность (прочность) цилиндрических соединений с натягом обычно оценивают по таким параметрам, как фактическая площадь контакта, контактное давление и коэффициент трения. Поскольку сила трения возрастает с ростом фактической площади касания, естественно, прочность прессовых посадок в значительной мере определяется ее размерами. Фактическая площадь контакта неразрывно связана с деформацией микровыступов, определяющей жесткость узлов машин, имеющих стыковое соединение. Изучение характера изменения фактической площади контакта позволяет оценить зависимость коэффициента трения от продолжительности контакта, шероховатости и других факторов. Таким образом, фактическая площадь контакта является одним из важнейших параметров, характеризующих процессы, происходящие при контактировании твердых тел.

При оценке деформации и несущей способности отдельных выступов поверхности последние чаще всего моделируются правильными геометрическими телами. Предварительно, исходя из условий контактирования и природы материала, оценивается преобладающий характер деформации выступов и в соответствии с этим выбирается исходная расчетная модель. Например, для грубо обработанных поверхностей из высокопрочных материалов контакт считается пластическим, а при больших нагрузках необходимо учитывать и наклеп. Для поверхностей высокой чистоты обработки или поверхностей, подвергшихся повторному циклическому нагружению, контакт будет упругим. Для наклепанных поверхностей высокой чистоты обработки контакт можно считать упруго-пластическим. В этой связи традиционно рассматриваются следующие четыре модели контактирования сопрягаемых поверхностей при статическом нагружении [1].

Первая модель. При упругом контакте нагрузка N_i , приходящаяся на единичный выступ, согласно формуле Герца составляет

$$N_i = 1,33 \cdot \frac{r^{0,5} h_{\max}^{1,5} E}{1 - \mu^2} \varepsilon_i^{1,5},$$

где r – радиус кривизны вершин выступов; $h_{\max}$ – максимальная высота неровностей; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ε – относительное сближение поверхностей.

Поскольку в реальных условиях число выступов, как правило, велико, а площадь, приходящаяся на один выступ, весьма мала, величину, выражающую площадь фактического контакта A_r как функцию от числа выступов n_r , можно считать практически непрерывной.

Тогда нагрузка, приходящаяся на все выступы (n_r), может быть выражена

$$N = \int_0^{n_r} N_i dn_r. \quad (1)$$

Связывая приращение числа выступов dn_r с видом опорной кривой, можно записать:

$$dn_r = \frac{A_a b v \varepsilon^{v-2} d\varepsilon}{2\pi r h_{\max}},$$

где b и v – коэффициенты, характеризующие кривую опорной поверхности;

A_a – номинальная площадь контакта.

Тогда соотношение (1) примет вид

$$N = \frac{0,66 K_2 E h_{\max}^{0,5} A_a b}{\pi (1 - \mu^2) r^{0,5}} \varepsilon^{v+0,5}. \quad (2)$$

Выразив отсюда относительное сближение поверхностей ε , можно определить фактическую площадь контакта η_1 :

$$\eta_1 = \left\{ \frac{2,35 b^{\frac{0,5}{v}} r^{0,5} (1 - \mu^2) N}{2^{\frac{0,5}{v}} K_2 h_{\max}^{0,5} E A_c} \right\}^{\frac{2v}{2v+1}}, \quad (3)$$

где A_c – контурная площадь; K_2 – коэффициент, зависящий от v .

Вторая модель. При пластическом контакте нагрузка, приходящаяся на все выступы (n_r), составляет

$$N = \int_0^{n_r} N_i dn_r = C \sigma_s A_c b \varepsilon^v. \quad (4)$$

Выражая отсюда относительное сближение поверхностей ε , можно определить фактическую площадь контакта η_1 , которая составит:

$$\eta_1 = \frac{q_c}{C \sigma_s}, \quad (5)$$

где $q_c = \frac{N}{A_c}$ – удельная контурная нагрузка;

$C \sigma_s$ – среднее напряжение на контакте; C – коэффициент;

σ_s – предел текучести материала в предельно наклепанном состоянии.

Третья модель. В случае пластического контакта с упрочнением нагрузка N_i , приходящаяся на единичный выступ, зависит в числе прочего и от свойств материала. С учетом этого нагрузка составит

$$N_i = 2^{0,5\vartheta} \pi H_y h_{\max}^{0,5\vartheta} r^{2-0,5\vartheta} \varepsilon^{0,5\vartheta}, \quad (6)$$

где H_y – коэффициент, характеризующий пластическую деформацию материала;

ϑ – коэффициент, характеризующий свойства материала.

Тогда фактическая площадь контакта η_1 составит

$$\eta_1 = \left\{ \frac{r^{\omega} b^{\frac{\omega}{v}} N}{2^{\omega} h_{\max}^{\omega} H_y A_c K_3} \right\}^{\frac{v}{v+\omega}}, \quad (7)$$

где ω – коэффициент, характеризующий упрочнение материала;

K_3 – коэффициент, зависящий от коэффициента ω и вида кривой опорной поверхности.

Четвертая модель. При наличии упруго-пластического контакта критическая деформация a_k выступа, соответствующая переходу от упругой деформации к пластической, может быть представлена следующим образом:

$$a_k = 5,35(1 - \mu^2)^2 C^2 \left(\frac{\sigma_s}{E} \right)^2 r, \quad (8)$$

где σ_s – предел текучести.

При некотором сближении ε часть выступов с площадью η_n будет деформироваться пластически, а другая часть выступов на площади η_y будет деформироваться упруго. Тогда вся площадь, находящаяся в контакте, оценивается следующим образом:

$$\eta_l = \eta_n + \eta_y. \quad (9)$$

После соответствующих преобразований можно показать:

$$\eta_l = \delta + \frac{1}{2} \frac{b^v v \varepsilon_k}{\delta^{\frac{v-1}{v}}}, \quad (10)$$

где $\delta = \frac{q_c}{q_m}$ – отношение контурного давления к давлению, переводящему выступ в пластическое состояние;

$\varepsilon_k = \frac{a_k}{h_{\max}}$ – отношение критического сближения к максимальной высоте неровностей.

Таким образом, при традиционном, статическом режиме нагружения формируется напряженно-деформированное состояние, описываемое тем или иным набором моделей контактирования, – соотношения (3), (5), (7), (10). При этом модели контактирования являются строго предопределенными.

Приложение вибрационных воздействий в ходе запрессовки дает возможность изменения режима нагружения путем изменения амплитуды и частоты возбужденных колебаний. Появляется возможность управления режимами контактирования, т. е. возможен переход, например, от модели упругого контакта к упруго-пластическому контакту или пластическому контакту. Это обусловлено влиянием высокочастотных колебаний на свойства и структуру деформируемого металла, контактные условия, а также изменением схемы напряженного состояния и в некоторых случаях дискретным и динамическим характером протекания деформации. Действие каждого из указанных факторов проявляется в зависимости от направления колебаний, их типа, места расположения зоны деформации. Поэтому при выборе моделей колебательных систем необходимо производить оценку эффективности модели с точки зрения механизма воздействия резонансных колебаний на параметры деформации контактирующих поверхностей [3]. Очевидно, это должно позволить направленно воздействовать на условия контактирования (деформации). С позиции теории дислокаций снижение сопротивления пластической деформации объясняется как результат воздействия ультразвука на дислокационный механизм пластической деформации, в частности, активизацию подвижности дислокаций (активных центров) в приповерхностных слоях соединяемых поверхностей, вследствие чего они обладают высокой внутренней энергией, т. е. повышенной способностью к схватыванию.

Важным для понимания природы формирования схватывания является то, что уже в самом начале запрессовки в условиях резонанса возникают зоны схватывания. Их, естественно, немного, так как они появились там, где под действием усилия пришли в соприкосновение наиболее высокие микронеровности. Зоны схватывания испытывают значительные деформации. Поскольку места схватывания упрочнены по сравнению с основаниями схватившихся микронеровностей, то эти деформации сказываются главным образом на менее прочном элементе соединения [2]. Поэтому металл в основании микронеровности пластически течет. Происходит первая стадия известного в работах по трению разрушения прочного узла схватывания – вытягивание. Оно обуславливает характерное пластическое течение металла в основании микронеровности, которое в ряде работ (см., например, [2]) называют турбулентным.

Таким образом, уже в начале запрессовки пластические течения захватывают и некоторую область, удаленную от соединяемых поверхностей в глубь деталей. Развитие этого процесса, естественно, сопровождается некоторым сближением поверхностей из-за течения металла в узлах схватывания и появлением новых узлов.

Сложность исследования процессов сборки и оценки качества формируемых соединений обуславливается, с одной стороны, множеством воздействующих факторов, большая часть которых носит вероятностный характер, а с другой стороны, отсутствием надежных методов и средств для непосредственной оценки механизмов контактного взаимодействия деталей в процессе сборки. Одним из перспективных методов решения этой проблемы является применение вычислительной техники и компьютерных технологий [3].

Для проведения экспериментов по выявлению закономерностей формирования областей схватывания при запрессовке и определения факторов, влияющих на качество образуемых соединений, была разработана автоматизированная система научных исследований [3]. Проведена серия экспериментов по запрессовке твердосплавных зубков в шарошку бурового долота. Шарошка бурового долота была имитирована плоским диском, изготовленным из стали 19ХГНМА (долотная сталь) и прошедшим механическую и химико-термическую обработку, аналогичную серийной технологии обработки шарошек буровых долот. Для запрессовки использовались серийные заводские твердосплавные зубки из сплава ВК10 диаметром 7,8 мм.

Режимы запрессовки зубков шарошечных долот

Наименование параметра	Диапазон значений
Натяг	(0,08÷0,11) мм
Скорость перемещения штока	(0,001÷0,01) м/с
Амплитуда прикладываемых колебаний	(1÷20) мкм
Частота прикладываемых колебаний	Автоподстройка резонанса (18÷22) кГц
Время выдержки	(1÷60) сек

Априори выполнялась подготовка зубков и отверстий на условиях селективной сборки, то есть непосредственно перед ультразвуковой запрессовкой замерялись диаметры отверстий в корпусе шарошки, которые разделялись на три размерные группы, и далее к каждому отверстию подбирался соответствующий размерной группе твердосплавный зубок – таким образом, чтобы обеспечить вариативность натяга в пределах от 0,08 до 0,11 мм.

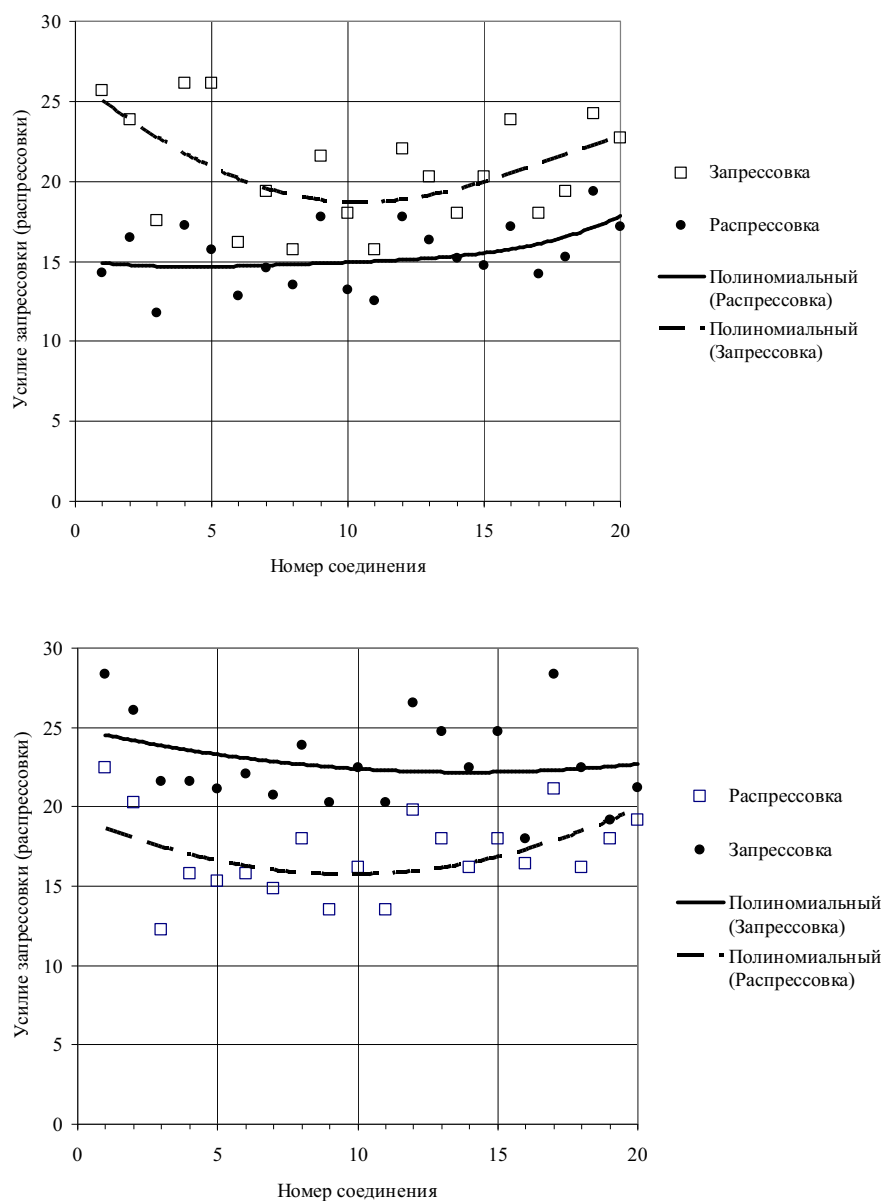


Рис. 1. Результаты измерения усилий запрессовки (распрессовки) при формировании прессовых соединений:
а) без наложения ультразвуковых колебаний; б) с наложением ультразвуковых колебаний

При проведении процесса запрессовки ультразвуковые колебания накладывались изначально для снижения трения, а затем – при достижении зубками заданного положения – задавались колебания с выдержкой по времени без относительного перемещения деталей, т. е. реализовывался режим схватывания [4]. В таблице приведены основные характеристики режимов запрессовки зубков шарошечных долот.

Одной из характеристик качества сформированного соединения является усилие распрессовки, необходимое для разрушения соединения. Соответствующие усилия оценивались как по показаниям датчика усилия, так и по показаниям манометра гидравлического пресса.

По результатам эксперимента были построены линии тренда (рис. 1), характеризующие усилия запрессовки и распрессовки при различных подходах к процессу формирования соединения (с использованием ультразвуковых колебаний и без них). Проведенный анализ полученных результатов позволил выделить следующие существенные моменты:

- при использовании ультразвуковых колебаний в процессе формирования соединения усилие распрессовки превышает усилие запрессовки;
- усилие распрессовки для соединения, образованного с использованием ультразвуковых колебаний, больше аналогичного усилия для соединения, сформированного без использования ультразвуковых колебаний;
- при формировании прессового соединения с использованием ультразвуковых колебаний требуется меньшее усилие по сравнению с усилием в аналогичном процессе без дополнительных колебательных воздействий.

Как отмечено выше, взаимодействия контактирующих поверхностей характеризуются формированием узлов схватывания. При этом общая площадь такого рода областей также характеризует качество формируемого соединения с точки зрения повышения его прочности. Была выдвинута гипотеза о влиянии на формирование узлов схватывания времени выдержки при наложении ультразвуковых колебаний в процессе прессования. При этом «время выдержки» означало время, в течение которого фиксировалось положение зубка, а ультразвуковые колебания продолжали поступать.

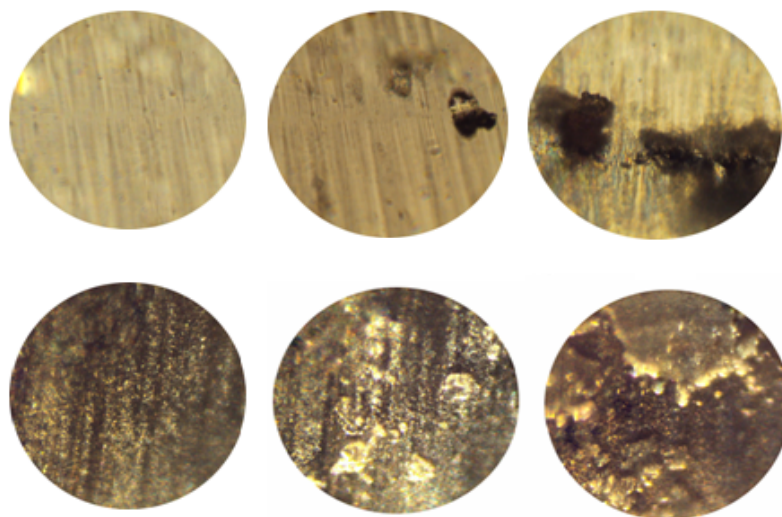


Рис. 2. Микрофотографии поверхности прессовых соединений после воздействия ультразвука различной продолжительности::

- а) поверхность отверстия без режима выдержки; б) поверхность отверстия при воздействии ультразвука в течение 1 сек.; в) поверхность отверстия при воздействии ультразвука в течение 30 сек.; г) поверхность зубка без режима выдержки; д) поверхность зубка при воздействии ультразвука в течение 1 сек.; е) поверхность зубка при воздействии ультразвука в течение 30 сек.

Исследование поверхности твердосплавных зубков на наличие узлов схватывания производилось на модернизированном для этих целей микроскопе МИС-11. Поверхность твердосплавных зубков была исследована до запрессовки и после распрессовки.

Анализ показал, что при воздействии ультразвука в течение одной секунды (рис. 2, в) площадь узлов схватывания в зонах контакта составляет 3,5% от общей видимой поверхности зубка. С увеличением времени воздействия ультразвука относительная площадь узлов схватывания возрастает (10 сек. – до 14%, 30 сек. (рис. 2, г) – до 56%), а далее начинает снижаться и, например, при воздействии ультразвука в течение 60 сек. не превышает 40%.

Аналогично исследовалась поверхность отверстий на наличие узлов схватывания. Анализ показал, что при воздействии в течение 1 сек. в местах контакта обнаруживаются вырывы металла, свидетельствующие об образовании узлов схватывания (рис. 2, а) на поверхности отверстия. Увеличение времени выдержки до 30 сек. приводит к возрастанию узлов схватывания (рис. 2, б).

На рис. 3 приведен график, иллюстрирующий изменение величины относительной площади узлов схватывания от времени воздействия ультразвука и формируемого натяга.

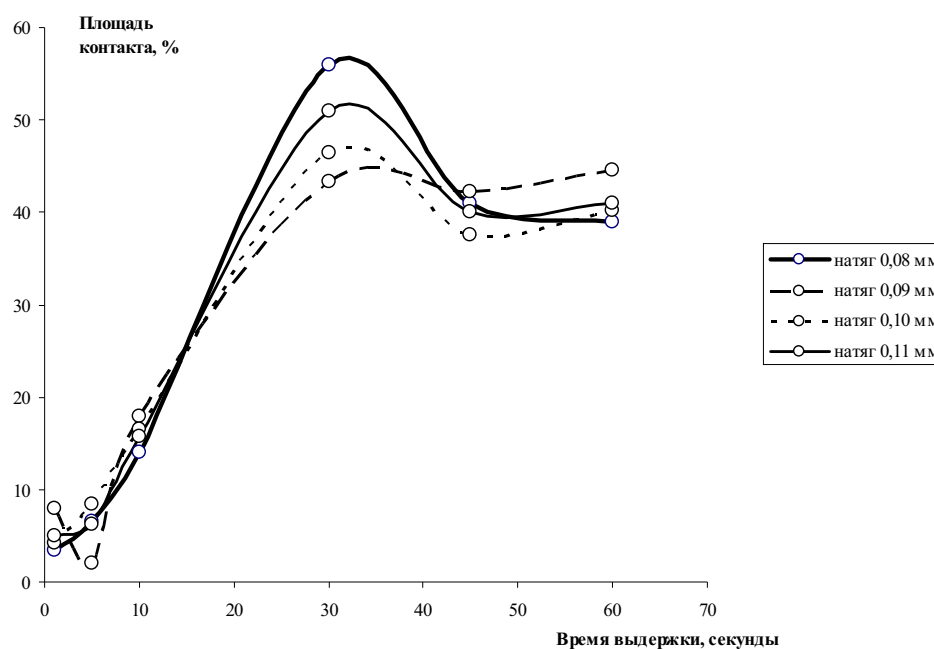


Рис. 3. График зависимости относительной площади узлов схватывания от времени воздействия ультразвука и формируемого натяга

Анализ графика показывает, что наиболее эффективный режим наблюдается при 30 сек., в этом случае образуются максимальные по относительной величине узлы схватывания.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- наложение ультразвуковых колебаний в процессе запрессовки повышает прочность формируемого соединения, что подтверждается увеличением значений усилия распрессовки;
- использование в процессе ультразвуковой запрессовки дополнительной временной выдержки (без поступательного движения подвижного элемента) позволяет увеличить относительную площадь узлов схватывания;
- определены оптимальные условия формирования режима схватывания при запрессовке твердосплавных зубков (сплав ВК10) диаметром 7,8 мм в шарошку бурового долота (сталь 19ХГНМА).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. – М.: Наука, 1960. – 110 с.
2. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
3. Штриков Б.Л., Шувачев В.Г., Патишев В.А. Автоматизированная система научных исследований процессов ультразвуковой сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2007. – №12. – С. 19-22.
4. Патент РФ на изобретение № 2357848. Способ запрессовки твердосплавных зубков в корпус шарошки бурового долота / Богомолов Р.М., Ищук А.Г., Кремлёв В.И., Носов Н.В., Шувачев В.Г., Патишев В.А. Оpubл. 10.06.2009.

Статья поступила в редакцию 13 мая 2011 г.

UDC 621.757:62-752

USAGE OF ULTRASONIC VIBRATIONS OF LOW AMPLITUDE FOR FORMING THE FORGING COMPOUNDS FOLLOWED BY ANALYSIS OF RESISTANCE CHARACTERISTICS

D.V. Ankoudinov, O.M. Batishcheva, V.A. Papshev, V.G. Shuvaev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

This paper presents the analysis of processes occurring while assembling with ultrasonic small-amplitude oscillation superposition. Based on conducted experiments the factors which influence joint durability are defined.

Keywords: assembling, ultrasonic oscillations, resulting joint, joint quality.

D.V. Ankoudinov – Assistant.

O.M. Batishcheva – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.

V.A. Papshev – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.

V.G. Shuvaev – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.