

Глава 5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИБРОУДАРНАЯ РАЗБОРКА ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Мачихо Д.В., Сакевич В.Н.

УО «Витебский государственный технологический университет»

г. Витебск, Беларусь, E-mail: igsakevich@yandex.ru

Введение

По статистике около 40 % неисправностей дизельных двигателей приходится на топливную аппаратуру. При этом около 80 % отказов и свыше 40 % затрат на устранение неисправностей топливной аппаратуры связано с распылителями форсунок (рис.1).

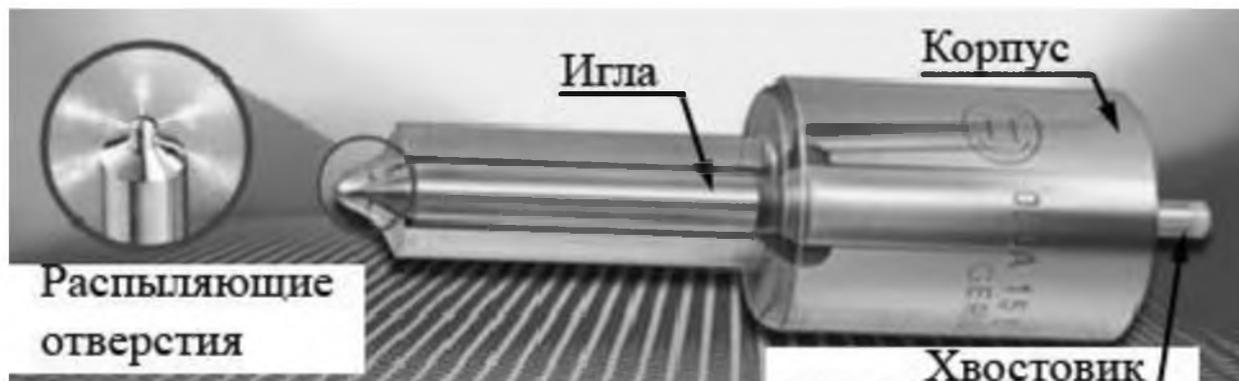


Рисунок 1 – Распылитель форсунки в собранном виде

Нарушения в работе распылителей форсунок (свыше 90 %) возникают вследствие накопления загрязнений (закоксовывания) на внутренних и наружных поверхностях корпуса и иглы, а также в распыляющих отверстиях корпуса распылителя форсунки, обусловленных специфическими термоокислительными превращениями топлива при высоких температурах, прорывом газов во внутреннюю полость распылителя и др. факторов (рис.2). В процессе ремонта часто возникают проблемы разборки распылителя форсунки, что связано с образованием коррозии между соприкасающимися прецизионными поверхностями корпуса и иглы (рис.1) в процессе эксплуатации. Слипание корпуса и иглы распылителя форсунки настолько прочно, что чисто механически провести разъединение без повреждений прецизионных поверхностей изделия не представляется возможным. По этой причине десятки тысяч распылителей форсунок стоимостью от 6 \$ за штуку ежегодно попадают в металлолом. Если корпус и иглу распылителя форсунки разъединить без их повреждения и очистить от образовавшихся загрязнений, то можно использовать распылитель форсунки по назначению повторно без дополнительной обработки, так как изделие имеет ещё большой запас ресурса по износу.



Рисунок 2 – Нагар, образующийся на распылителях форсунок

Известные в современном производстве способы рассоединения деталей и их очистки не позволяют решить указанную проблему в условиях массового производства с высокой производительностью и без возможного повреждения прецизионных поверхностей в процессе разборки. В этой связи требуются совершенно новые технические решения поставленной задачи, основанные на результатах, полученных при всестороннем и глубоком исследовании механизмов рассоединения деталей.

Для решения вышеизложенной актуальной для ремонтных предприятий задачи

по разборке распылителя форсунки и его очистке в условиях массового производства также нужна принципиально новая машина, создающая в распылителе форсунки определенный спектр колебаний, которые приведут к интенсивному разрушению коррозии между соприкасающимися прецизионными поверхностями корпуса и иглы без возможного их повреждения.

Спектральные особенности колебаний, возникающих в стержневой конструкции после импульсного воздействия на неё

При разработке ультразвуковых технологий для достижения положительного эффекта часто возникает необходимость создания определенного спектра колебаний в объектах различного технологического назначения [1]. В данном разделе обобщены результаты экспериментального изучения спектров колебаний стержневой конструкции после импульсного воздействия на неё как периодическими, так и одиночными импульсами.

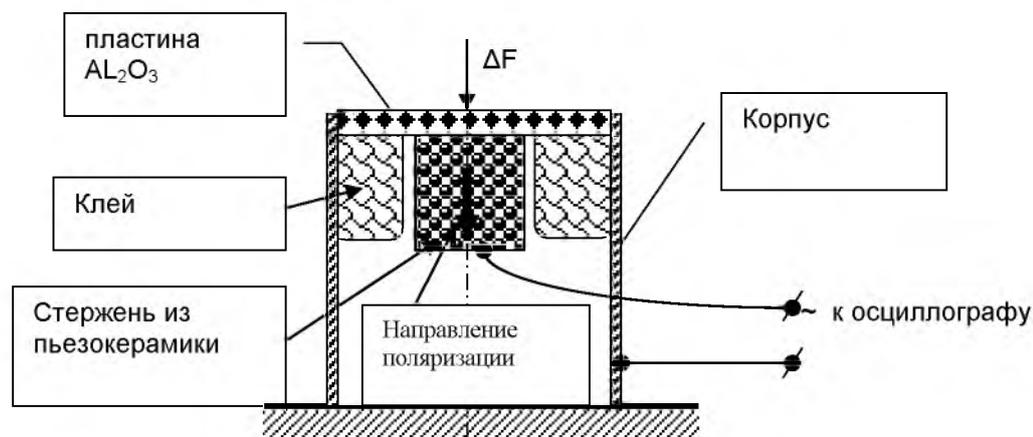


Рисунок 3 – Схема стержневой конструкции

На рисунке 3 представлена схема стержневой конструкции, разработанной для проведения исследований. В металлический корпус в виде трубчатого цилиндра вклеена эпоксидным клеем металлизированная с одной стороны круглая керамическая пластинка из Al_2O_3 толщиной 2 мм. Металлизированная сторона пластины с помощью пайки соединялась с корпусом, а затем пластину жестко фиксировали с корпусом эпоксидным клеем. К металлизированной стороне пластины приклеивали токопроводящим клеем стержень длиной 6,5 мм круглого поперечного сечения из пьезокерамического материала цирконата титаната свинца (ЦТС 850), поляризованного, как показано на рисунке 3. Периодическое воздействие на пластину из Al_2O_3 осуществляли торцом волновода ультразвукового преобразователя с частотой $f=18$ кГц или периодом – $T=56$ мкс [1]. На рисунках 4,а и 4,б приведены осциллограммы колебательных режимов стержневой системы. Анализ осциллограмм показывает, что периодическое воздействие на пластину можно осуществить в двух режимах.

Первый режим – виброударный (рис.4,а), когда воздействие торца волновода ультразвукового преобразователя на стержневую систему осуществлялось с разрывом контакта взаимодействующих элементов. Кривая 2 на такой осциллограмме представляла собой сигнал, возникающий при ударе торцом волновода ультразвукового преобразователя по пластине и последующих затухающих собственных колебаниях стержневой конструкции. При таких режимах время удара торцом волновода ультразвукового преобразователя по пластине стержневой конструкции составляло $t_{уд}=0,46 \cdot T=26$ мкс.

Второй режим – безударный (рис.4,б), когда воздействие торца волновода ультразвукового преобразователя на стержневую конструкцию осуществлялось в безотрывном режиме в зоне контакта взаимодействующих элементов.

В режимах виброударного типа (рис.4,а) сила взаимодействия носит импульсный характер с частотой равной частоте колебаний ультразвукового преобразователя и шириной импульса равной времени удара $t_{уд}=26$ мкс. Спектр колебаний стержневой

конструкции согласно теореме сложения [2] будет представлен двумя частотами – частотой $f=18$ кГц виброударных колебаний равной частоте колебаний торца волновода ультразвукового преобразователя и частотой $f_0=156$ кГц собственных продольных колебаний пьезокерамического стержня. При безотрывном режиме движения взаимодействующих элементов в зоне контакта (рис.4,б) колебания в стержневой конструкции осуществлялись с частотой равной частоте колебаний ультразвукового преобразователя. В обоих случаях основной спектр колебаний являлся дискретным. Если же импульс, какой угодно формы периодически повторять, то мы получим периодическую функцию, обладающую дискретным гармоническим спектром [2].

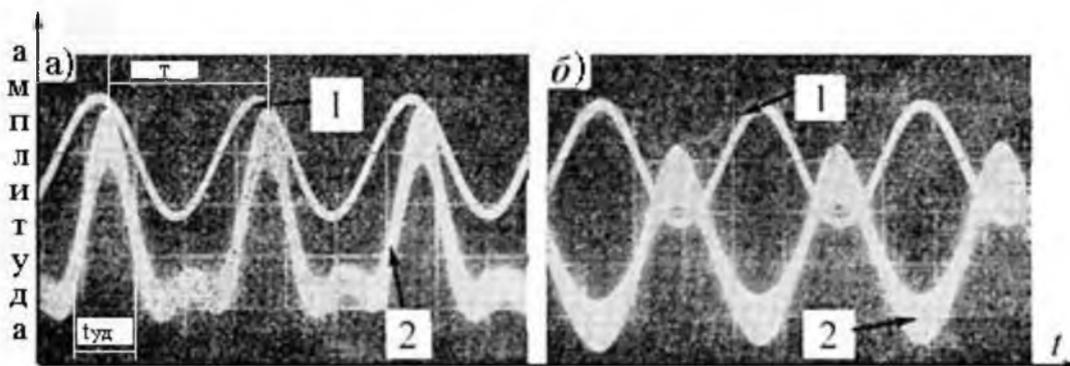


Рисунок 4 – Осциллограммы колебательных режимов стержневой конструкции при периодическом внешнем воздействии: а – ударный режим воздействия, б – безударный, 1– сигнал с генератора возбуждения колебаний ультразвукового преобразователя, 2 – колебания стержневой конструкции

Отметим, что между периодическими сигналами и их частотными спектрами существует взаимно-однозначное соответствие: периодический сигнал полностью определяет её частотные спектры и, наоборот, имея частотные спектры, можно определить, какому периодическому сигналу они принадлежат [2].

Воздействие на стержневую конструкцию одиночным импульсом создавалось следующим образом. На поверхности параллелепипеда из оргстекла с размерами $400 \times 400 \times 120$ мм фокусировался короткий лазерный импульс с длиной волны излучения $0,53$ мкм и длительностью импульса 6 нс. Генерируемый при этом в оргстекле акустический импульс имел N-образную форму, его длительность была менее 1 мкс, и фронт распространения представлял собой полусферу. С противоположной стороны параллелепипеда в центре к нему приклеивалась стержневая конструкция, представленная на рисунке 3. Сигнал от параллелепипеда из оргстекла на стержень передавался через пластину из Al_2O_3 . Сигналы со стержневой конструкции поступали на аналого-цифровой преобразователь, имеющий частоту дискретизации 100 МГц и управляемый персональным компьютером. Для получения спектральных характеристик использовалась программа анализатора спектров в пакете программ MATLAB. На рисунке 5,а представлена осциллограмма регистрируемого сигнала, а на рисунке 6,б его спектральная характеристика (амплитудно-частотная).

Как видно из рисунка 6,б, спектр от одиночного импульса является сплошным и занимает достаточно широкую частотную область в пределах от 60 кГц до 600 кГц при собственной частоте продольных колебаний пьезокерамического стержня $f_0=156$ кГц. Вторая особенность колебаний стержневой конструкции от воздействия одиночного импульса это ярко выраженные резонансы порядка 8 видов различных форм колебаний, которые возникают в стержневой конструкции. На спектральной характеристике (рис. 6,б) резонансы различных форм колебаний отображаются в виде локальных максимумов сигнала и пронумерованы цифрами в порядке возрастания частоты: 1 – это резонанс продольных колебаний соответствующих пьезокерамическому стержню с суммарной длиной собственной плюс толщина пластины $-f_0=156$ кГц, 2 – резонанс соответствующий продольным колебаниям чисто пьезокерамического стержня с длиной до места склейки с пластиной.

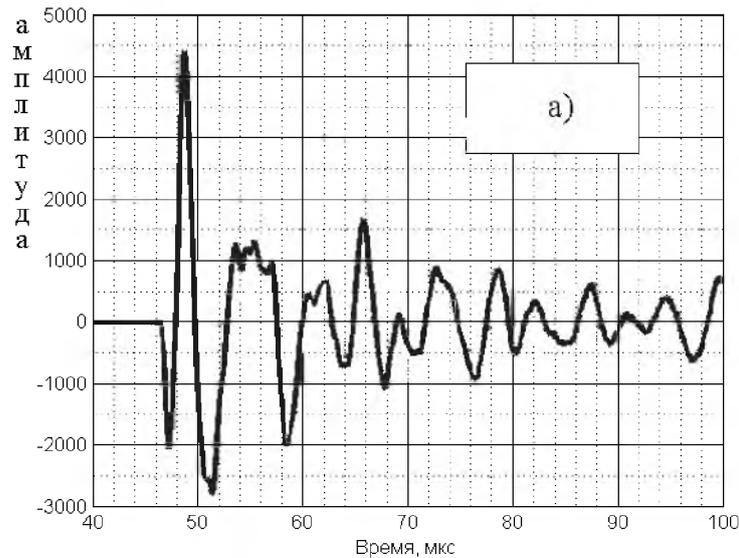


Рисунок 5,а – Осциллограмма колебательных режимов стержневой конструкции при воздействии одиночным импульсом

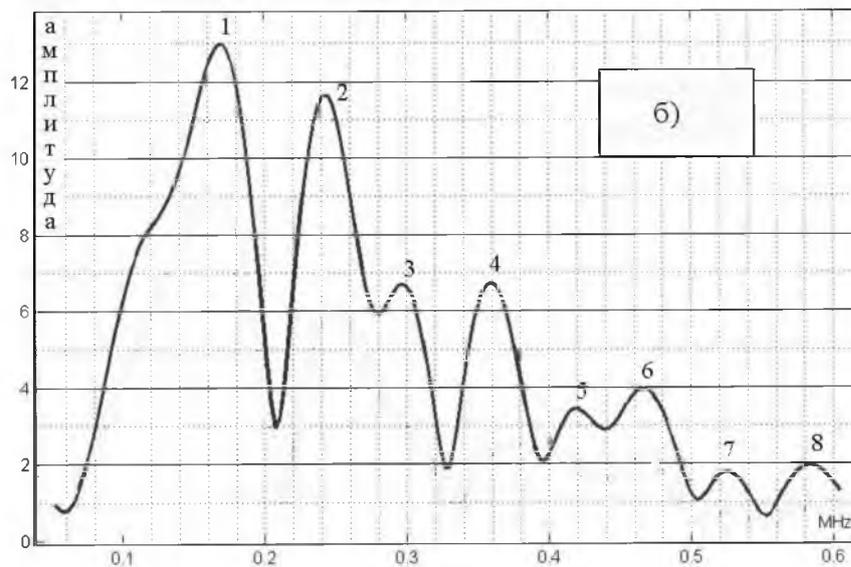


Рисунок 6,б – Спектральная характеристика стержневой конструкции при воздействии одиночным импульсом

Непериодические сигналы характеризуются непрерывным, сплошным спектром частот, в то время как периодические – дискретным или линейчатым спектром [2]. Если последовательность повторяющихся импульсов непериодична, то связь между спектрами установить нельзя, но если импульсы повторяются беспорядочно, то такая связь существует [2].

Вопрос о соотношении между длительностью импульса Δt и шириной его спектра Δf имеет громадное практическое значение. Известно, что чем короче импульс, тем шире его спектр, в частности, бесконечно короткий импульс имеет бесконечно протяженный спектр с равной плотностью [2]. В инженерной практике принимают в первом приближении независимо от формы сигнала следующее соотношение [2]:

$$\Delta t \cdot \Delta f \approx 1 \quad (1)$$

Оценим максимальную ширину спектра при длительности импульса $\Delta t = t_{уд} = 26$ мкс при воздействии одиночным импульсом с длительностью равной времени удара $t_{уд}$ при виброударном взаимодействии. Из (1) получим: $\Delta f \approx 10^6 / 26 \approx 38,5$ кГц. Как видим, что при

воздействии одиночным импульсом с длительностью импульса $\Delta t = t_{уд} = 26$ мкс мы не сможем получить весь спектр колебаний, который представлен на рисунке 6,б. Чтобы в стержневой системе проявились все резонансы, отмеченные на рисунке 6,б, время удара должно быть порядка 2 мкс или $T/28$ и ударное воздействие не должно быть периодическим. В этом случае в сплошном спектре частот с разной плотностью найдутся резонансные частоты, на которые отреагирует стержневая система всеми 8 резонансами.

Встает вопрос, какой сигнал ударного воздействия считать периодическим, а какой нет. На практике должно быть так, чтобы период ударного воздействия $t_{уд}$ был больше времени необходимого для полного затухания возникших колебаний $t_{зат}$ от предыдущего воздействия.

Время полного затухания $t_{зат}$ определяется следующим соотношением [3]:

$$t_{зат} = 1/(f_0 d) \quad (2)$$

где $d = \pi/Q$ – логарифмический декремент затухания колебаний в стержневой системе, Q – её добротность. Для пьезоматериала из цирконата титаната свинца (ЦТС 850) $Q = 80$ [4]. После вычислений получим оценку для времени полного затухания возникших колебаний в стержневой системе: $t_{зат} = 163,2$ мкс. Условие на период ударного воздействия, при котором в стержневой конструкции периодическое ударное воздействие будут восприниматься, как одиночные импульсы следующее: $t_{уд} > 163,2$ мкс. Соответственно получается максимальная частота ударного периодического воздействия, при которой стержневая конструкция периодическое воздействие будет воспринимать как одиночные импульсы и спектр частот будет сплошным определится как $f_{уд} \leq 6,1$ кГц.

Оценим собственные частоты распылителя форсунки (рис.7) при импульсном воздействии ΔF на него, как показано на рисунке 8. Будем рассматривать распылитель форсунки в первом приближении как ступенчатый стержень и каждая ступень – это стержень постоянного сечения. Первая гармоника возбудится на длине $l_1 = 25$ мм, и её частоту найдем как для полуволнового волновода из соотношения $f_1 = c/2l_1$, где $c = 5150$ м/с – скорость распространения продольных волн в тонком стержне в материале распылителя форсунки (легированная сталь). Частота колебаний будет $f_1 \approx 103$ кГц. Вторая основная гармоника возбудится на длине всего стержня $l_1 = 51,5$ мм, частота её собственных колебаний будет $f_2 \approx 50$ кГц.

Оценим необходимую длительность одиночного импульса Δt воздействия на распылитель форсунки, чтобы частотная ширина сплошного спектра Δf была такова, чтобы в сплошной спектр колебаний попал хотя бы резонанс собственных колебаний распылителя $f_2 \approx 50$ кГц, т.е. должно быть $\Delta f > 50$ кГц. Из (1) получим: $\Delta t < 10^6/50000 = 20$ мкс $= 0,357 \cdot T$, что реально сделать, создав более жесткую контактную пару взаимодействующих элементов торца волновода и корпуса форсунки по сравнению с взаимодействием торца волновода и стержневой конструкции и тем самым уменьшить время удара на 30%.

Получим оценку для времени полного затухания возникших колебаний в распылителе форсунки. Время полного затухания определяется из (2) следующим соотношением $t_{зат.ф} = 1/(f_2 d_f)$, где $d_f = 9,4 \cdot 10^{-3}$ логарифмический декремент затухания колебаний в стали. Окончательно получим $t_{зат.ф} = 2122$ мкс. Откуда следует, что максимальная частота ударного периодического воздействия, при котором распылитель форсунки будет воспринимать периодическое воздействие как одиночные импульсы и спектр частот будет сплошным определится как $f_{уд} \leq 471,2$ Гц.

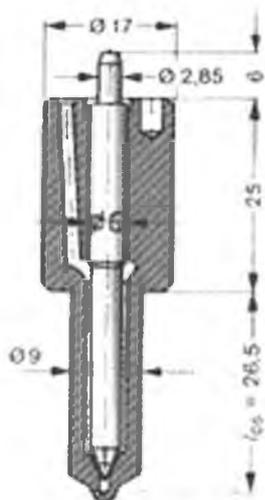


Рисунок 7 – Чертеж распылителя форсунки

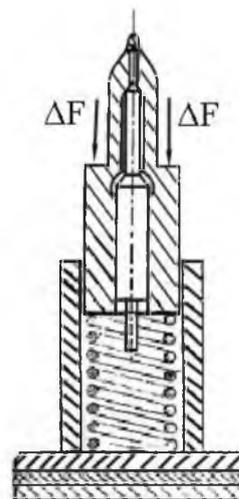


Рисунок 8 – Импульсное воздействие на распылитель форсунки

Таким образом, для создания интенсивных вибраций в распылителе форсунки для достижения положительного эффекта необходимы следующие условия:

- режим взаимодействия торца волновода и корпуса форсунки – виброударный;
- длительность удара $t_{уд}$ между торцом волновода и корпусом распылителя форсунки при заданных размерах распылителя форсунки должно удовлетворять следующему условию:

$$t_{уд} < 20 \text{ мкс} = 0,357 \cdot T; \quad (3)$$

- при периодическом взаимодействии частота соударений должна быть:

$$f_{уд} \leq 471,2 \text{ Гц}; \quad (4)$$

- или удары должны осуществляться в стохастическом режиме.

Анализ способов разборки деталей топливной аппаратуры

Самое первое упоминание о применении ультразвука для разборки деталей топливной аппаратуры относится к 1972 году [5]. В изобретении говорится о том, что известны способы разборки деталей топливной аппаратуры, заключающиеся в том, что одну из деталей приводят в колебания электрическим генератором. Однако ограниченная эффективность и возможность повреждения прецизионных поверхностей не позволяют широко использовать известный способ. Предлагается способ, который позволяет повысить эффективность разборки без повреждения сопряженных прецизионных поверхностей. Это достигается тем, что колебания осуществляют с ультразвуковой частотой в жидкой среде, например водно-щелочном растворе. Известен способ разборки соединения типа вал - втулка и устройство для его осуществления [6] (рис.9). Целью изобретения является повышение производительности и качества разборки за счет воздействия на обе разбираемые детали и исключения ударного характера воздействия с ультразвуковой частотой на деталь типа втулка. Разбираемое соединение размещают в ванне 3. При этом втулку 2 устанавливают в ложемент 7 упора 6, а ультразвуковой преобразователь 5 опускают до упора в верхнюю торцовую поверхность втулкой 2.

Затем с помощью преобразователя 5 втулке 2 сообщают осевые колебания с ультразвуковой частотой. Пружины 9 обеспечивают постоянный контакт втулки 2 с преобразователем 5. При движении втулки 2 вниз раствор 4-начинает вытесняться из-под вала 1. Однако размеры и коническая форма отверстия 8 исключают свободное вытеснение раствора 4 через него. В результате этого происходит соударение вала 1 с раствором 4, находящимся под ним. При движении втулки 2 вверх под валом 1 создается разрежение, и раствор 4 через отверстие 8 затекает в ложемент 7.

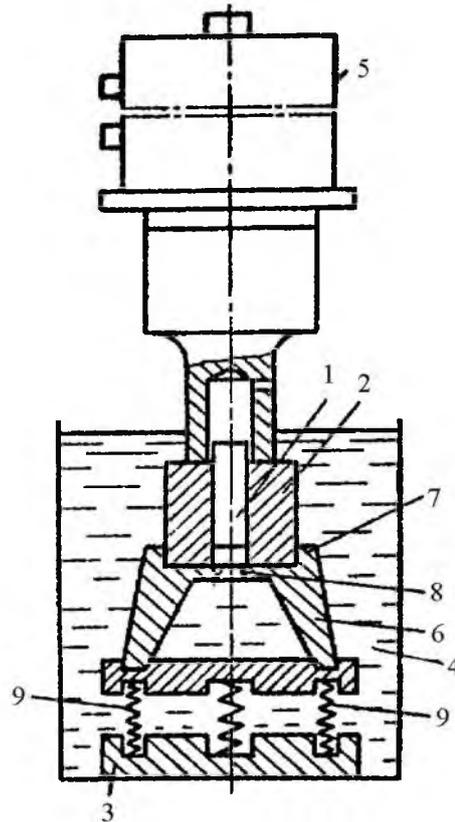


Рисунок 9 – Устройство для ультразвуковой разборки соединения типа вал – втулка: 1 – вал; 2 – втулка; 3 – ванна; 4 – водно-щелочной раствор; 5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – упор; 7 – ложемент; 8 – коническое отверстие; 9 – витые цилиндрические пружины

Недостатком устройства является невысокий уровень интенсивности процесса разборки и невозможность напрямую использовать его для разборки распылителя форсунки.

Известно устройство для разборки и очистки распылителя форсунки [7] (рис. 10). Устройство содержит ванну 1 с моющим раствором, ультразвуковой преобразователь 2 и упор 3 под распылитель 4 с иглой 5. Упор 3 выполнен в виде стакана 6 со ступенчатым днищем 7, образующим со стенкой 8 кольцевую полость 9 и снабженным центральным отверстием 10 для установки распылителя 4. В стенке 8 стакана 6 выполнены подпиточные каналы 11.

При работе устройства ультразвуковой преобразователь 2 возбуждает колебания, которые воспринимаются упором 3 через распылитель 4. Колебания приводят к кавитационному разрушению нагара в среде моющего раствора, обеспечивая, таким образом, подвижность иглы 5 в распылителе 4 и его очистку.

Реализация устройства, по мнению авторов изобретения, позволяет повысить срок его службы, так как исключена поломка упора. Кроме этого, устройство обеспечивает повышение производительности разборки и очистки, так как сокращено время установки и съема распылителя.

Недостатком устройства является невысокий уровень интенсивности процесса разборки и сложность его резонансной подстройки в виброударном режиме.

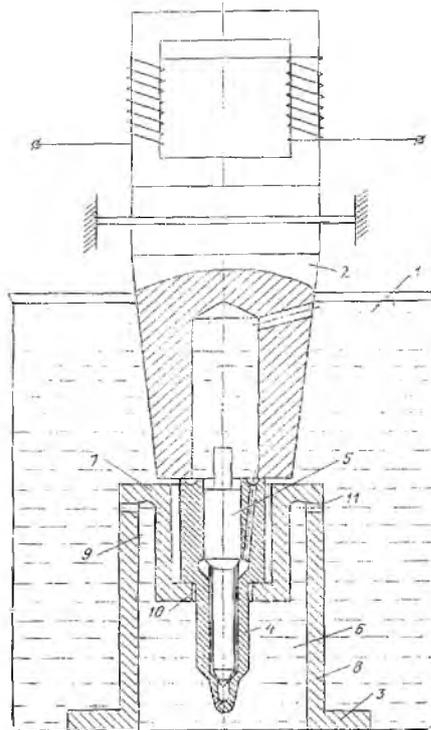


Рисунок 10 – Устройство для разборки и очистки распылителя форсунки: 1 – ванна; 2 – ультразвуковой преобразователь; 3 – упор; 4 – распылитель; 5 – игла; 6 – стакан; 7 – ступенчатое днище; 8 – стенка; 9 – кольцевая полость; 10 – центральное отверстие; 11 – подпиточные каналы

Известно устройство для разборки распылителя форсунки [8] (рис.11). Согласно изобретению упор расположен над корпусом распылителя форсунки, а источник ультразвуковых колебаний - под корпусом распылителя, при этом распылитель форсунки в сборе ориентирован хвостовиком иглы вниз с обеспечением возможности свободного выхода последней из корпуса распылителя под собственным весом. Определенный порядок пространственного расположения основных элементов устройства (источника ультразвуковых колебаний под корпусом распылителя форсунки, а упора – над ним) изменяет баланс удерживающих и разбирающих сил при разборке соединения «корпус распылителя форсунки – игла распылителя». В этом случае сила тяжести иглы распылителя (ее собственный вес) принудительно переводится в разряд разбирающих сил и интенсифицирует процесс разборки, т.е. становится дополнительной силой, способствующей разъединению деталей соединения в условиях снижения трения под воздействием ультразвуковых колебаний. Во всех известных ранее устройствах сила тяжести вала (или иглы) являлась удерживающей силой и препятствовала процессу разборки. В приспособлении распылитель форсунки устанавливается хвостовиком иглы распылителя вниз, что с одной стороны дает возможность перевести силу тяжести иглы распылителя в разряд разбирающих сил, а с другой - не препятствует свободному выходу иглы из корпуса распылителя под действием ее силы тяжести. На рисунке 11 использованы следующие обозначения: G – сила тяжести иглы распылителя форсунки, a – амплитуда колебательных смещений. Устройство для разборки распылителя форсунки содержит источник ультразвуковых колебаний, выполненный в виде стержневой колебательной системы, которая крепится вертикально на верстак или на специально изготовленную раму (на рис. 11 не показаны). Стержневая колебательная система снабжена входящим в ее состав трансформатором амплитуды продольных колебаний (концентратором) 1, предназначенным для передачи ультразвуковых колебаний разбираемому соединению. В концентраторе 1 выполнено глухое отверстие 2. Разбираемый

распылитель форсунки, состоящий из корпуса 3 и иглы 4, установлен на рабочий торец концентратора 1 так, что игла своим хвостовиком 5 входит внутрь отверстия 2. В устройстве предусмотрен упор 6, надетый сверху на корпус 3 распылителя форсунки, который, контактируя с корпусом 3, прижимает последний посредством винтовых пружин 7 к рабочему торцу концентратора 1 и обеспечивает соосное положение по вертикали корпуса 3 и иглы 4 распылителя форсунки с концентратором 1. При этом упор 6 расположен над корпусом 3 разбираемого распылителя, источник ультразвуковых колебаний с концентратором 1 – под корпусом 3 распылителя, а распылитель форсунки в сборе ориентирован хвостовиком 5 иглы 4 вниз с обеспечением возможности свободного выхода последней из корпуса 3 распылителя под действием собственного веса при ультразвуковом воздействии.

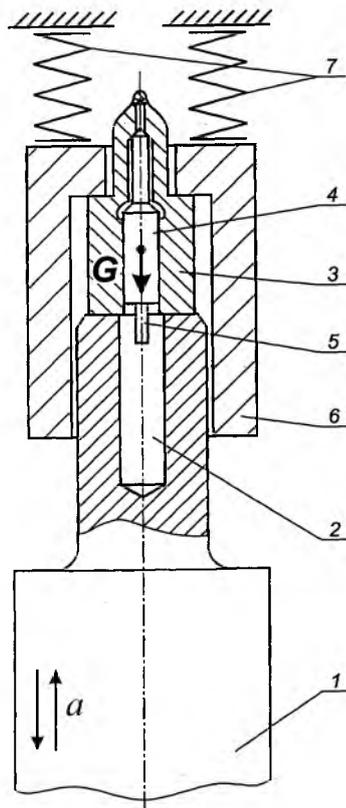


Рисунок 11 – Устройство для разборки распылителя форсунки: 1 – торец трансформатора амплитуды продольных колебаний (концентратор); 2 – отверстие; 3 – корпус распылителя форсунки; 4 – иглы распылителя форсунки; 5 – хвостовик иглы; 6 – упор; 7 – винтовые пружины

Устройство работает следующим образом. Для разборки распылитель форсунки устанавливается на рабочий торец концентратора 1 так, чтобы игла 4 распылителя своим хвостовиком 5 была ориентирована вниз, и ее хвостовик 5 входил в отверстие 2 концентратора 1. На корпус 3 распылителя форсунки сверху надевается упор 6. За счет винтовых пружин 7, воздействующих на упор 6, корпус 3 распылителя прижимается к рабочему торцу концентратора 1. После установки все перечисленные элементы устройства автоматически оказываются расположенными вдоль вертикальной оси, совпадающей с осью стержневой колебательной системы. При работе стержневой колебательной системы ультразвуковые колебания с амплитудой a передаются от концентратора 1 корпусу 3 распылителя. Из-за высокой инерционности системы прижима корпуса 3 распылителя к торцу концентратора 1 («упор 6 – винтовые пружины 7»), на корпус 3 распылителя передаются не непрерывные ультразвуковые колебания, а импульсные, в виде периодических ударов. Вследствие этих импульсных ударов на иглу 4 распылителя периодически действует сила инерции, направленная вертикально вниз и вместе с силой тяжести G иглы 4 распылителя стремящаяся

удалить иглу 4 распылителя из корпуса 3 распылителя. Кроме того, по мнению авторов изобретения, наложение колебаний на соединение «корпус распылителя – игла распылителя» снижает величину силы трения между этими деталями. Сочетание указанных процессов вызывает направленное движение иглы 4 распылителя вниз и постепенный выход ее из корпуса 3 распылителя, что приводит к разборке данного соединения. В процессе разборки игла 4 распылителя имеет возможность свободно опускаться в отверстие 2 концентратора 1.

Недостатком известного устройства является невысокий уровень интенсивности процесса разборки и невозможность очистки корпуса и иглы распылителя.

Известно ультразвуковое устройство для разборки распылителя форсунки [9] рисунок 12. Ультразвуковое устройство относится к техническим средствам механизации технологических процессов разборки заклиненных распылителей форсунок дизельных двигателей. Указанный результат достигается тем, что в ультразвуковом устройстве для разборки распылителя форсунки, содержащем расположенные вертикально и соосно концентратор для передачи ультразвуковых колебаний на распылитель и упор для закрепления между ними корпуса разбираемого распылителя в сборе с иглой, ориентированной хвостовиком вниз, концентратор расположен над упором и в нем выполнено глухое осевое отверстие и канал, посредством которого с помощью линии связи глухое осевое отверстие сообщено с источником подачи жидкой рабочей среды под давлением для воздействия последней на иглу разбираемого распылителя.

На решение поставленной технической задачи направлено также то, что упор выполнен в виде гайки, навинченной на концентратор. Решение поставленной технической задачи достигается тем, что канал выполнен в боковой поверхности концентратора радиально. На решение поставленной технической задачи направлено также то, что в качестве рабочей среды использованы вода, моющие растворы или топливо.

Сокращение времени на разборку распылителя форсунки достигается благодаря интенсификации процесса разборки за счет создания дополнительной гидравлической силы, действующей на иглу в отверстии концентратора, которая действует совместно с силой тяжести иглы, повышая скорость разборки в условиях снижения трения под воздействием ультразвуковых колебаний.

Свободный выход иглы из корпуса распылителя обеспечивается тем, что распылитель форсунки ориентирован хвостовиком иглы вниз.

На рисунке 12 схематично изображена конструкция ультразвукового устройства. На рисунке приняты следующие обозначения:

- Р – давление рабочей среды;
- а – амплитуда колебаний;
- G – сила тяжести иглы.

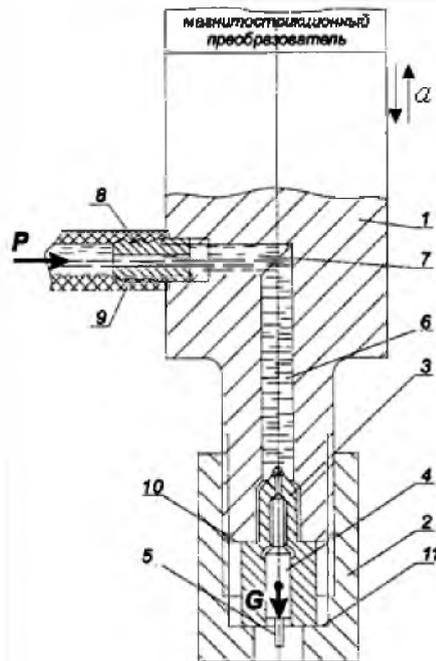


Рисунок 12 – Ультразвуковое устройство для разборки распылителя форсунки:

- 1 – трансформатор амплитуды продольных колебаний (стержневой концентратор);
 2 – упор - гайка; 3 – корпус распылителя; 4 – игла распылителя форсунки; 5 – хвостовик иглы;
 6 – глухое осевое отверстие; 7 – канал для подачи рабочей среды под давлением; 8 – штуцер;
 9 – шланг; 10 – торец концентратора; 11 – опорную поверхность упора 2

Ультразвуковое устройство для разборки распылителя форсунки содержит расположенные вертикально и соосно магнитострикционный преобразователь (на рис.12 не обозначен), связанный с ним концентратор 1 для передачи ультразвуковых колебаний на распылитель форсунки (на рис.12 не обозначен) и упор 2 для закрепления между ним и концентратором 1 корпуса 3 разбираемого распылителя в сборе с запорной иглой 4. Последняя ориентирована своим хвостовиком 5 вниз. Концентратор 1 расположен над упором 2, который представляет собой гайку, навинченную на концентратор 1. При этом, в концентраторе 1 выполнено глухое осевое отверстие 6 и связанный с ним канал 7, выполненный, например, радиально в боковой поверхности концентратора 1. Таким образом, в частном случае ось канала 7 может быть перпендикулярна оси концентратора 1. Глухое осевое отверстие 6 сообщено с источником подачи жидкой рабочей среды в виде, например, заполненного частично ресивера (на рис.11 не показан) посредством канала 7 со штуцером 8 на выходе с помощью линии связи в виде шланга 9 с возможностью воздействия рабочей среды на иглу 4 разбираемого распылителя. При этом корпус 3 распылителя прижат к торцу 10 концентратора 1 и опирается на опорную поверхность 11 упора 2. В качестве рабочей среды, подаваемой в канал 7 и отверстие 6, могут быть использованы жидкие вещества, например, такие как вода, моющие растворы или топливо.

Устройство работает следующим образом.

Распылитель форсунки в сборе – корпус 3 с запорной иглой 4, устанавливают под концентратором 1 на опорной поверхности 11 упора 2 в виде гайки, заводят в глухое отверстие 6 часть корпуса 3 распылителя с его рабочей стороны и прижимают корпус 3 к рабочему торцу 10 концентратора 1, навинчивая упор 2 в виде гайки на концентратор 1. При этом хвостовик 5 запорной иглы 4 направлен вниз. Затем включают магнитострикционный преобразователь и подают рабочую среду по шлангу 9 и штуцеру 8 под давлением, большим атмосферного, например, воду, моющие растворы, топливо по каналу 7 к отверстию 6. Наложение ультразвуковых колебаний с амплитудой a на соединение «корпус 3 – игла 4», по мнению авторов изобретения, снижает величину силы трения между этими деталями. Одновременно под действием постоянного давления P рабочая среда выталкивает иглу 4 из корпуса 3 распылителя, действуя в одном направлении с силой тяжести G иглы 4. Совместное действие

гидравлического давления P и силы тяжести G иглы 7 приводит к значительной интенсификации процесса разборки, что позволяет уменьшить по мнению авторов изобретения требуемое на разборку распылителя время.

В частном случае, когда канал 7 для подачи рабочей среды выполнен радиально в боковой поверхности концентратора 1, обеспечивается более технологичная схема подключения рабочей полости отверстия 6 к источнику гидравлического давления.

Таким образом, по мнению авторов, полезная модель позволяет снизить время на разборку распылителя форсунки.

Недостатком известного устройства является неудобная загрузка распылителя форсунки и по этой причине низкая производительность и неэффективность применения в условиях массового производства. Каждый раз для установки распылителя форсунки на рабочее место нужно отвинчивать и навинчивать упор 2 в виде гайки на концентратор, т.е. одна машина – один оператор.

Качественная очистка всегда связана с выбором в каждом конкретном случае оптимальных условий, включающих выбор режима работы колебательной системы, химического состава и температуры моющей среды, пространственного расположения деталей в кавитационной области.

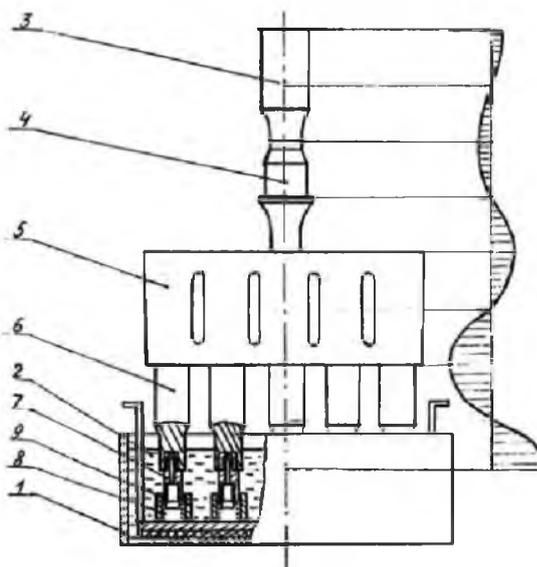


Рисунок 13 – Устройство для ультразвуковой контактной очистки изделий и распределение амплитуды продольных колебаний в ультразвуковой акустической системе: 1 – ванна; 2 – моющая жидкость; 3 – электроакустический преобразователь; 4 – трансформатор амплитуды продольных колебаний; 5 – длинноконтурный волновод; 6 – волноводы стержневого типа; 7 – корпуса распылителя форсунок; 8 – упругие элементы (винтовые цилиндрические пружины сжатия); 9 – держатель

Известно устройство (рис.13) для ультразвуковой контактной очистки изделий [10], содержащее ванну с моющей жидкостью, акустическую колебательную систему в виде ультразвукового преобразователя и волноводов стержневого типа, содержит акустическую опору в виде упругих элементов, расположенных напротив излучающих торцов волноводов стержневого типа с противоположной стороны, относительно очищаемых изделий, а акустическая система выполнена с последовательно соединенными между собой трансформатором амплитуды продольных колебаний и длинноконтурным волноводом, при этом трансформатор амплитуды продольных колебаний входным торцом жестко связан с ультразвуковым преобразователем, а излучающая поверхность длинноконтурного волновода связана с волноводами стержневого типа. Предлагаемое устройство содержит упругую опору в виде упругих элементов, что позволяет посредством изменения степени их деформирования производить регулирование усилия прижима изделия к колеблющейся поверхности волноводов стержневого типа и тем самым дает возможность оптимизировать режим виброударного взаимодействия для достижения максимальной эффективности

процесса очистки. Использование в заявляемом устройстве дополнительно введенных в акустическую колебательную систему трансформатора амплитуды продольных колебаний и длинноконтурного волновода, последовательно соединенных между собой, обусловлено необходимостью соответственно повышения амплитуды колебаний излучающих торцов волноводов стержневого типа и числа одновременно очищаемых деталей. При этом устройство допускает без изменения его конструкции применение трансформаторов амплитуды продольных колебаний с разными коэффициентами усиления, что позволяет для данного вида загрязнений, с целью достижения максимальной эффективности процесса очистки, выбрать оптимальную амплитуду колебаний. Для крепления акустической системы как целого технологического узла на трансформаторе амплитуды выполнен буртик. Такое крепление разгружает ультразвуковой преобразователь, что способствует увеличению его срока службы.

Введение в акустическую колебательную систему длинноконтурного волновода позволяет подводимую к нему от трансформатора амплитуды энергию ультразвуковых колебаний распределить на большую поверхность. Выполнение в волноводе пазов в направлении распространения колебаний позволяет достигнуть равномерного распределения амплитуды смещения по всей излучающей поверхности. В результате чего может быть увеличено число присоединенных к этой поверхности волноводов стержневого типа, а, следовательно, и количество одновременно очищаемых деталей.

Данное устройство хорошо и быстро моет корпуса распылителей форсунок, а недостатком является невысокий уровень интенсивности процесса разборки изделия на составные элементы – корпус и иглу, которые спеклись друг с другом в процессе эксплуатации.

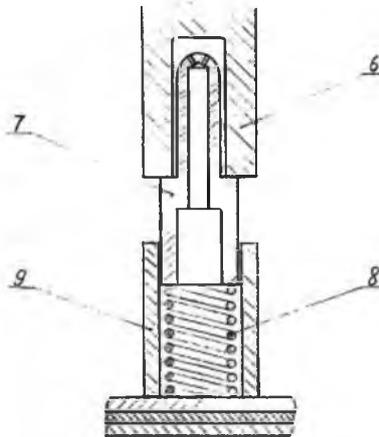


Рисунок 14 – Увеличенное изображение зоны очистки устройства изображенного на рисунке 13:7 – корпуса распылителя форсунок; 8 – упругие элементы (винтовые цилиндрические пружины сжатия); 9 – держатель

Сравнительный анализ эффективности и производительности известных устройств для разборки прецизионных изделий на составные элементы в условиях серийного производства

Чтобы сравнить эффективность и производительность устройств для разборки прецизионных изделий на составные элементы и их очистки нужно выяснить физическую сущность явлений, с которыми связана работа рассмотренных устройств и оценить хотя бы качественно их эффективность.

При статическом способе рассоединения корпуса и иглы форсунки на разрывной машине – отрывается хвостовик у иглы. Игла распылителя форсунки изготовлена из стали P18 и закалена до твердости HRC 60. Предел прочности стали P18–840 Н/мм², диаметр хвостовика 2,85 мм (рис.7), следовательно приложенное усилие составляет порядка 6 кН. Усилия в 6 кН недостаточно для рассоединения изделия при статическом нагружении. Отметим, что в тех редких случаях, когда

статическим нагружением удавалось рассоединить иглу и корпус форсунки, происходило повреждение прецизионных поверхностей корпуса и иглы распылителя форсунки.

В устройствах, представленных на рисунках 9–13 разборка осуществляется, возможно, ударным воздействием на распылитель форсунки с ультразвуковой частотой вынуждающей силы электроакустического преобразователя. Авторы изобретений на режимах взаимодействия не акцентируют внимания, хотя это важно. Ударные воздействия сопровождаются значительными силами инерции, действующими на распылитель форсунки и должны привести к накоплению микродеформаций усталостного характера в коррозионной прослойке, образовавшейся между внутренней поверхностью корпуса и наружной поверхностью иглы в процессе эксплуатации. Следует отметить, что во всех устройствах, представленных на рисунках 9–13 действуют на коррозионную прослойку напряжения сдвига.

В работе [1] приведены зависимости амплитуды силы удара F_m от статического усилия подачи P (рис.15). Эти зависимости получены при постоянной частоте вынуждающей силы $f=18$ кГц и различных значениях амплитуды холостого хода (без нагрузки) a . Из графиков видно, что существует оптимальное усилие подачи, соответствующее максимуму силы удара. Величина оптимального усилия подачи пропорциональна амплитуде холостого хода a . Увеличение подачи сверх оптимальной приводит к уменьшению силы взаимодействия, а режимы при этом постепенно становятся безударными. Как видно из рисунка 15 амплитуда силы удара F_m не превышает 0,6 кН при амплитуде колебаний холостого хода порядка 30 мкм, что на порядок ниже возможных статических усилий. Следовательно, разрушение в коррозионной прослойке возможно только за счет микродеформаций усталостного характера.

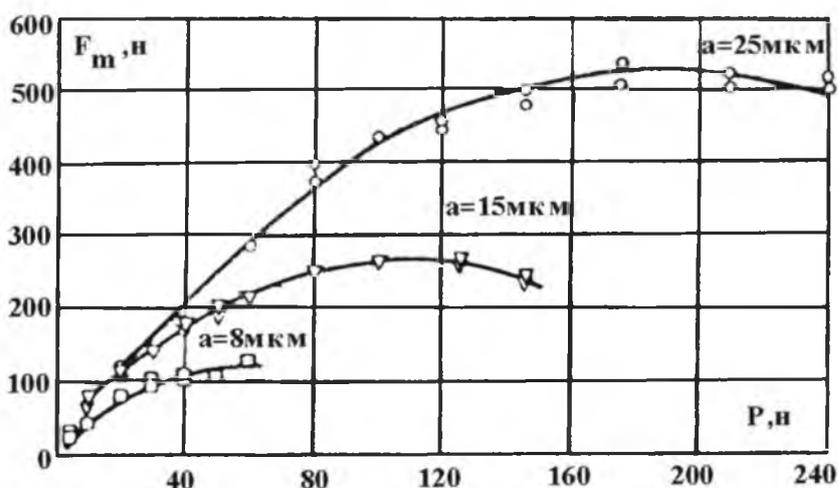


Рисунок 15 – Зависимость амплитуды силы удара F_m от статического усилия подачи P

Опыт показывает, что усталостное разрушение происходит при напряжениях ниже предела прочности, а часто и ниже предела текучести. Способность материала противостоять усталостным разрушениям зависит от времени действия нагрузки и от цикла напряжений. В схемах, приведенных на рисунках 9–11, 13, напряжения изменяются по отнулевому циклу, а в схеме на рисунке 12 – по симметричному циклу. Следует отметить, что нагружение происходит с частотой 18 кГц.

Обратим внимание на то, что в схеме, приведенной на рисунке 12, виброударный режим отсутствует и разъединение осуществляется за счет больших переменных сил инерции изменяющихся по симметричному циклу. Распылитель форсунки жестко соединен с колебательной системой и совершает совместные колебания с торцом электроакустического преобразователя с частотой колебаний $f=18$ кГц и амплитудой $a=30$ мкм. В результате таких движений на иглу распылителя форсунки действуют силы инерции, вызванные колебательным ускорением с амплитудой $(2\pi f)^2 a = 38 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$. Если масса иглы порядка $20 \cdot 10^{-3}$ кг, то при таком колебательном движении иглы на

коррозионную прослойку действует сила инерции по симметричному циклу с амплитудой порядка 7,7 кН. Известно, что при любой деформации нагружение с симметричным циклом наиболее опасно [12]. Предел выносливости материала имеет минимальное значение при симметричном цикле (σ_{-1}) и максимальное – при отнулевом (σ_0).

С позиций динамики наиболее удачно техническое решение, предложенное в работе [9] и проиллюстрировано на рисунке 12, но это техническое решение не пригодно при массовом производстве, где важна производительность.

Устройствам, представленным на рисунках 9, 11, 13 недостатком устройств является невысокий уровень интенсивности процесса разборки изделия на составные элементы – корпус и иглу. Это связано с тем, что упругие элементы обладают жесткостью намного меньшей, чем сплошной стержень и при виброударном взаимодействии существенно снижают контактную жесткость и тем самым уменьшают силу удара взаимодействующих элементов. Снижение силы удара снижает силы инерции, которые задействованы в разрушении коррозионной прослойки.

В работе [11] предлагается способ контактной ультразвуковой очистки изделий путем погружения изделия в моющий раствор, возбуждения в растворе высокоамплитудных ультразвуковых колебаний и создания механического контактного взаимодействия колеблющейся поверхности ультразвукового источника колебаний и изделия, причем механическое контактное взаимодействие осуществляют в стохастическом виброударном режиме.

За прототип можно принять устройство [10] (рис.13) и в нем осуществить контактное взаимодействие колеблющейся поверхности ультразвукового источника колебаний и распылителя форсунки в стохастическом виброударном режиме. Тогда в широкополосном частотном спектре колебаний, возникающих в распылителе форсунки будут существовать частоты, совпадающие с частотами различных форм собственных колебаний корпуса и иглы распылителя форсунки. В результате к периодическим напряжениям сдвига, действующим на коррозионную прослойку, добавятся растягивающие напряжения по симметричному циклу от различных интенсивных собственных форм колебаний корпуса форсунки. Это приведет к более интенсивному разрушению коррозионной прослойки между иглой и корпусом распылителя форсунки. За счет интенсивных вибраций в изделии, оно как бы «стряхнёт» с себя загрязнения, а кавитационное воздействие, вызванное интенсивными вибрациями изделия на различных собственных частотах меньшей частоты вынуждающей силы, дополнительно интенсифицирует процесс очистки по всей поверхности изделия, включая каналы и отверстия. Увеличение резонансного размера кавитационной полости, происходящее при снижении частоты, увеличивает ударный импульс при её захлопывании и повышает тем самым эрозионное воздействие на поверхность. В этом смысле снижение резонансной частоты до 8–10 кГц является эффективным. Обычно такие частоты рекомендуется применять при очистке деталей, имеющих кавитационно-стойкие загрязнения (нагары, окалина).

Заключение

Для эффективного рассоединения корпуса и иглы распылителя форсунки в условиях массового производства без повреждения прецизионных поверхностей деталей необходимо создать интенсивные колебания различных форм в распылителе форсунки.

Чтобы возбудить интенсивные колебания в распылителе форсунки, режим взаимодействия торца волновода и корпуса форсунки должен быть виброударный, а взаимодействие между торцом волновода и корпусом форсунки должно осуществляться стохастическими импульсами или периодическим воздействием с частотой соударений $f_{уд} \leq 471,2$ Гц. Длительность удара $T_{уд}$ между торцом волновода и корпусом распылителя форсунки при заданных размерах распылителя форсунки должна удовлетворять условию (3) $T_{уд} < 20$ мкс. В этом случае спектр частот, возбуждаемых в распылителе форсунки, будет сплошным, и в этом широкополосном частотном спектре будут существовать частоты, совпадающие с частотами различных форм собственных колебаний распылителя форсунки. При резонансе и возникновении интенсивных вибраций в изделии, оно как бы «стряхнёт» с себя загрязнения, а кавитационное воздействие, вызванное интенсивными вибрациями изделия,

дополнительно интенсифицирует процесс очистки по всей поверхности изделия, включая каналы и отверстия [11].

Технически реализовать механическое контактное взаимодействие в стохастическом виброударном режиме возможно только применяя ультразвуковые колебательные системы, в которых виброударный режим осуществляется между двумя колебательными системами с существенно отличающимися собственными частотами [1].

Отметим, что в инженерных задачах появление хаоса, как правило, считается неприятным явлением, так как приводит к непредсказуемому поведению решений. Однако создание устройств для разборки распылителя форсунки на составные элементы - корпус и иглу и их очистки, в которых целенаправленное генерирование стохастических колебаний приведет к положительному результату является редким исключением в инженерной практике.

Список литературы:

1. Артемьев, В.В. Ультразвуковые виброударные процессы / В.В. Артемьев, В.В. Клубович, В.Н. Сакевич. - Мн.: БНТУ, 2004. - 258 с.
2. Харкевич, А.А. Спектры и анализ –Серия: "Классика инженерной мысли: радиотехника". Изд-во: ЛИБРОКОМ, 2009. – 240 с.
3. https://ru.wikipedia.org/wiki/Логарифмический_декремент_колебаний
4. <http://www.symmetron.ru/suppliers/apc/>
5. Способ разборки деталей топливной аппаратуры: Авторское свидетельство СССР №416448, МПК F02M59/48 / Ю.А.Иванов, В.И. Фесенко, В.А. Петрушов; заявитель Ярославский завод топливной аппаратуры. – 1974г.
6. Способ разборки соединения типа вал - втулка и устройство для его осуществления: Авторское свидетельство СССР №1468705, кл. B23P19/04 / В.М. Приходько, М.Ю. Куприянов, В.А. Елизаров; заявитель Московский автомобильно-дорожный институт. – 1989г.
7. Устройство для разборки и очистки распылителя форсунки: Авторское свидетельство СССР № 659777, кл. F02M59/48 / В.П. Куликов, А.М. Гуляев, В.А. Петрушев, Ю.А. Иванов; заявитель Ярославский филиал Центрального опытно-конструкторского и технологического бюро Государственного всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института ремонта и эксплуатации машинотракторного парка. – 1979г.
8. Устройство для разборки распылителя форсунки: патент РФ на полезную модель № 15092, МПК B23P19/04 / В.М. Приходько, Ю.Н. Калачев, Б.А. Кудряшов, Р.И. Нигметзянов, Д.С. Фатюхин, Ф.А. Пинаев; заявитель Московский государственный автомобильно-дорожный институт (Технический университет). - 2000г.
9. Ультразвуковое устройство для разборки распылителя форсунки: патент РФ на полезную модель № 103774, МПК B23P19/04 / В.Ф. Казанцев, Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). – 2010г.
10. Устройство для ультразвуковой контактной очистки изделий: пат. № 7251 Респ. Беларусь, МПК7 B08B3/12 / А.С. Еремеев, В.Ф. Луцко, Р.В. Мазуренко, В.Н. Сакевич; заявитель Научно-производственное инновационное общество "БЕССАР" (BY). – 2004.
11. Способ контактной ультразвуковой очистки изделий: пат. № 6267 Респ. Беларусь, МПК7 B08B3/12 / А.С. Еремеев, В.В. Клубович, В.Ф. Луцко, В.Н. Сакевич; заявитель Институт технической акустики НАН Беларуси. – 2004г.
12. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем / В.А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005.