



theory of oscillations in problems of the dynamics of linear mechanical systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016. 459 p.

13. Eliseev S.V. Prikladnoi sistemnyi analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovanie (dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin: svyaznost' dvizhenii, vibratsionnye vzaimodeistviya, rychnazhnye svyazi): monografiya [Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: connectivity of movements, vibration interactions, lever linkages): a monograph]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. 692 p.

14. Eliseev S.V., Kargapol'tsev S.K. Otobrazhenie osobennosti soedineniya mekhanicheskikh elementov v teorii mekhanicheskikh tsepei [Presentation of specific aspects of the connection of mechanical elements in the theory of mechanical chains]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: tr. XIX Baikal. Vseros. Konf [Information and mathematical technologies in science and management: Proc. of XIX Baikal All-Russian conf.]*. Irkutsk, 2014. Pp. 100–108.

15. Eliseev S.V., Kargapol'tsev S.K., Kashuba V.B. Strukturnye preobrazovaniya – otobrazhenie dinamicheskikh vzaimodeistvii v kolebatel'nykh protsessakh [Structural transformations are the display of dynamic interactions in oscillatory processes]. *Vestnik SamGUPS*, 2016. No. 4 (34). Pp. 11–21.

16. Eliseev S.V., Orlenko A.I., Nguen D.Kh. Ustroistva dlya preobrazovaniya dvizheniya v strukture diady mekhanicheskoi kolebatel'noi sistemy [Motion translation devices in the structure of the dyad of a mechanical oscillatory system]. *Vestn. Donsk. gos. tekhn. un-ta [Vestnik of DSTU]*, 2017. Vol. 17. No. 3 (90). Pp. 46–59.

17. Eliseev S.V., Orlenko A.I., Eliseev A.V. Strukturnye obrazovaniya v mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistemakh: diady, ikh svoistva, vozmozhnosti izmeneniya dinamicheskikh sostoyanii [Structural formations in mechanical oscillatory systems: dyads, their properties, changeabilities of dynamic states]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2017. No. 3 (54). Pp. 56–63.

18. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. et al. Dinamicheskii sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob"ektov [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration isolation of technical facilities]. Irkutsk: IGU Publ., 2008. Pp. 523.

### Информация об авторах

### Authors

Елисеев Андрей Владимирович – к. т. н., доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eavsh@ya.ru

Елисеев Сергей Викторович – д. т. н., профессор, советник при ректорате по научной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: eliseev\_s@inbox.ru

Andrei Vladimirovich Eliseev – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor at the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: eavsh@ya.ru

Sergei Viktorovich Eliseev – Doctor of Engineering Science, Professor, Rectorate Adviser for Academic Affairs, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: eliseev\_s@inbox.ru

### Для цитирования

### For citation

Елисеев А. В. Особенности динамических свойств диады в подходах с позиций мезомеханики / А. В. Елисеев, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 23–33. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).23–33

Eliseev A. V., Eliseev S. V., Sizykh V. N. Osobennosti dinamicheskikh svoistv diady v podkhodakh s pozitsii mezomekhaniki [Peculiarities of dynamic properties of a dyad in approaches from the perspectives of mezo mechanics]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2, pp. 23–33. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).23–33

УДК 621.8.034

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).33–40

А. Г. Пермяков<sup>2</sup>, В. И. Шастин<sup>1</sup>, С. К. Каргапольцев<sup>1</sup>, А. В. Лившиц<sup>1</sup>, В. В. Лгалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «Иркутский релейный завод», г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 18 марта 2019 г.

## УДАЛЕНИЕ ЗАУСЕНЦЕВ С ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

**Аннотация.** Статья посвящена актуальным вопросам исследования процесса кавитационного удаления заусенцев с поверхности малогабаритных деталей коммутационной техники. Цель исследования заключается в разработке метода обработки деталей в жидкой среде при возбуждении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности и оценки их воздействия на объект исследования. Предложена методика и разработано лабораторное оборудование для проведения экспериментальных исследований. Выявлены наиболее функционально и практически значимые факторы, влияющие на активность процесса обработки, позволяющие многократно увеличить его эффективность. Рассмотрены возможные варианты обработки деталей из различных материалов, наиболее широко используемых в изделиях коммутационной техники. Исследовано влияние избыточного гидростатического давления и активизирующих добавок в рабочую среду в виде абразивных материалов и химически активных компонентов. Сформулированы технологические рекомендации удаления заусенцев с труднодоступных внутренних поверхностей, в том числе в пересекающихся каналах малого диаметра, и притупления острых кромок. Приведено описание



лабораторной установки, на которой проводились эксперименты по оценке влияния различных факторов на процесс удаления заусенцев. Обозначены результаты серии экспериментов, позволившие выявить наиболее эффективный состав рабочей среды для различных материалов. Полученные в рамках работы предварительные экспериментальные данные помогут наметить пути дальнейших исследований в этом направлении и внедрить технологии удаления заусенцев в производство.

**Ключевые слова:** кавитация, рабочая среда, поверхность, ультразвуковые колебания, абразив, рабочая камера, лабораторное оборудование.

A. G. Permyakov<sup>2</sup>, V.I. Shastin<sup>1</sup>, S. K. Kargapol'tsev<sup>1</sup>, A.V. Livshits<sup>1</sup>, V.V. Lgalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> JSC Irkutsk Relay Plant, Irkutsk, the Russian Federation

Received: March 18, 2019

## REMOVAL OF BURRS FROM THE SURFACE OF PARTS OF SWITCHING EQUIPMENT IN A HIGH-INTENSITY ULTRASOUND FIELD

**Abstract.** The article focuses on topical issues of studying the process of cavitation removal of burrs from the surface of small-size parts of switching equipment. The purpose of the study is to develop a method for treatment of parts in a liquid medium when high-intensity ultrasonic vibrations are excited and their effects on the object of study are evaluated. A methodology and laboratory equipment for experimental research has been proposed and developed. The authors have identified the most functional and practically significant factors that influence the activity of the treatment process to optimize it, which make it possible to multiply the treatment efficiency. Possible options for processing parts from various materials most widely used in switching equipment products are considered. The effect of excessive hydrostatic pressure and activating additives into the working environment, in the form of abrasive materials and chemically active components, was investigated. Technological recommendations are formulated to remove burrs from inaccessible internal surfaces, including intersecting channels of small diameter, and dulling sharp edges. The article provides the description of the laboratory installation, on which there were experiments conducted to assess the influence of various factors on the deburring process. The results of a series of experiments, which allowed identifying the most effective composition of the working environment for various materials. The preliminary experimental data obtained in the framework of this work make it possible to outline ways for further research in this direction and for introducing a deburring technology into production.

**Keywords:** cavitation, working environment, surface, ultrasonic vibrations, abrasive, working chamber, laboratory equipment.

### Введение

Ультразвуковая кавитация – это основной действующий фактор в значительной части ее практического применения. Использование явления кавитации предусматривает многие технологические процессы, применяемые в промышленности. Они основаны на эрозии материалов, а при сочетании с некоторыми эффектами обуславливают реализацию таких процессов, как диспергирование, эмульгирование, гомогенизацию, а также интенсифицируют диффузию, процессы очистки и ускоряют целый ряд различных физико-химических процессов. Изучению акустической кавитации посвящено большое количество работ [1–4]. Однако многие стороны этого процесса, особенно в ее кавитационной области, все еще недостаточно изучены. Особый практический интерес представляет его возможное использование в технологиях, где требуется ускорить одни процессы, повысить эффективность других, которые с применением иных видов энергии реализовать не удастся. В значительной степени это характерно и актуально при использовании кавитации в технологиях удаления заусенцев с поверхностей различных материалов после механической обработ-

ки, особенно деталей сложной формы и небольших размеров. Активность ультразвуковой кавитации в жидкости зависит от большого числа ее параметров – плотности, вязкости, температуры, содержания газов, присутствия инородных частиц, а также от параметров ультразвуковых колебаний, статического давления, частоты, интенсивности и прочих факторов, целенаправленным изменением которых можно влиять на активность процесса обработки с целью его оптимизации. Наиболее функционально и практически значимыми среди других факторов для данного вида обработки являются химический состав жидкости, избыточное гидростатическое давление и введение в состав рабочей среды абразивного материала. Это позволяет многократно увеличить эффективность обработки объекта.

В технологиях производства деталей и изделий коммутационной техники эффект кавитации используется ограниченно, в основном в процессах глубокой очистки и ряде иных видах обработки. Между тем, проблема удаления заусенцев и облоя с пластмассовых деталей в этой отрасли стоит весьма остро. Применяемые для этой цели процессы галтовки, анодно-абразивный, химиче-

ский, электроконтактный способы обработки имеют целый ряд недостатков, таких как конструктивная сложность исполнения, низкая эффективность, отсутствие возможности обрабатывать диэлектрические материалы и проч. [5–7]. В большинстве случаев эти операции выполняются вручную в несколько этапов с использованием шаберов, абразивного инструмента, металлических щеток, паст и др. В некоторых деталях из-за сложности формы и малого размера становится практически невозможным применение данных способов, особенно в условиях крупносерийного и массового производства. Проблема еще более усугубляется при необходимости обработки внутренних каналов и резьб малого диаметра. В этой связи возникает необходимость создания более универсального и эффективного метода их удаления.

### Некоторые общие положения

Известно, что вода является более активной средой в части развития интенсивной кавитации, чем органические растворители [8]. Присутствие газа в жидкости увеличивает кавитационную активность. Температура до определенного уровня повышает интенсивность кавитации, после чего наблюдается ее снижение. Эффективность кавитационной обработки находится в прямой зависимости от плотности мощности ультразвуковых колебаний. Рекомендуемая частота составляет 20–50

кГц. Наиболее важное значение в процессах интенсификации имеет соотношение между интенсивностью колебаний и избыточным статическим давлением в жидкости. Это позволяет существенно увеличить эрозионную активность и повысить скорость акустических течений. Кроме этого, выбор оптимального значения статического давления обеспечивает более равномерное распределение кавитационных пузырьков в объеме жидкости. При этом рост эрозионной активности происходит без увеличения затрат потребляемой энергии. К повышению интенсивности ударных волн и эрозионной активности приводит также уменьшение содержания газа в пузырьках, вследствие чего усиливается их сжимаемость. Дополнительно этому способствует дегазация жидкости от воздействия ультразвука [9, 10] (в кавитационные пузырьки поступает меньшее количество воздуха), сжимаемость пузырьков увеличивается и возрастает ударное давление. Важное значение для роста кавитационной активности имеет частота ультразвуковых колебаний. Исследования показали, что повышение частоты выше 40 кГц нецелесообразно, так как кавитационный пузырек не успевает вырасти до оптимальных размеров и его энергетические возможности при захлопывании снижаются. Уменьшение частоты также нецелесообразно, потому что из-за диффузии парогазовой смеси в его объем, а также в результа-

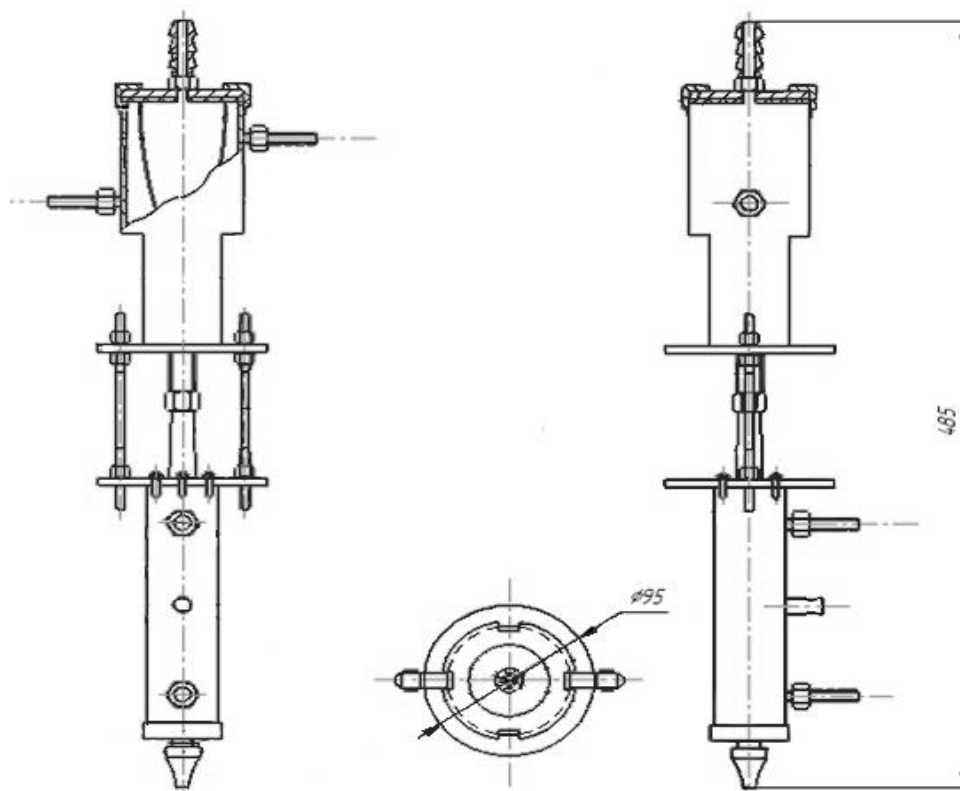


Рис. 1. Экспериментальная лабораторная установка:

а – схематическое изображение; б – общий вид; в – фрагмент рабочей камеры

те увеличения его радиуса снижается кавитационная активность [10, 11]. Немаловажное значение для усиления эрозионной активности, кроме повышения статического давления, имеет введение в состав рабочей жидкости абразивных частиц [9, 12, 13]. Зерна абразивного материала способствуют разрушению и отделению заусенцев. Кроме этого, они притупляют острые кромки деталей. Наибольшую роль в эффективности эрозии играет скорость частиц, которая напрямую зависит от скорости акустических потоков. Так, при обычном давлении их скорость составляет 500 мм/с, а при повышенном статическом давлении она может достигать сверхзвуковых пределов, при этом они могут перемещаться в жидкости на несколько микрометров. Прочность сцепления заусенца с основой детали значительно ниже прочностных характеристик самого материала, поэтому заусенец неизбежно отделится от детали раньше, чем начнет разрушаться ее поверхность, благодаря его низкой адгезионной и когезионной прочности, а также более высокой концентрации парогазовых пузырьков в зоне его нахождения. Эти и ряд других факторов и заключений легли в основу методологии экспериментальных исследований по разработке технологии удаления заусенцев с поверхности деталей коммутационной техники.

#### Экспериментальное оборудование

Для проведения исследований была разработана лабораторная экспериментальная установка (рис. 1) с использованием ультразвукового диспергатора УЗДН-1У4.2 [14, 15]. На рис. 2 показан общий вид установки и фрагмент рабочей камеры на рис. 3.



Рис. 2. Общий вид установки



Рис. 3. Рабочая камера (вид сверху)

Рабочая камера с помощью фланцевого соединения и системы уплотнений устанавливалась на волноводе излучателя. Для поддержания постоянной температуры в рабочем объеме камеры предусмотрена система охлаждения проточной водой.

При заполнении жидкости и загрузки деталей в рабочую камеру с помощью накидной гайки и резинового уплотнительного кольца осуществлялась герметизация объема камеры крышкой со штуцером для нагнетания избыточного давления от баллона со сжатым газом (азотом). После подачи проточной воды в систему охлаждения, в том числе ультразвукового излучателя, от баллона сжатого газа через редуктор подавалось избыточное давление в рабочую камеру. Величина давления при этом контролировалась с помощью манометра, исходя из условий эксперимента. Затем включался источник питания генератора и устанавливалась необходимая мощность излучателя. Наблюдения за изменением массы обработанных деталей в течение фиксированного времени и состоянием их поверхности осуществлялось через каждые 5 минут. При этом детали после каждого этапа обработки подвергались промывке и сушке в сушильном шкафу. Для взвешивания использовались электронные аналитические весы. Контроль и фотографирование (по необходимости) осуществлялось с использованием биологического микроскопа МБС при 100-кратном увеличении.

Обработке и контролю подвергались детали коммутационной техники из различных сплавов: латуни (Л63), бронзы (БрБ2) и ковара (Fe-Ni-Co) (рис. 4). Наибольшая концентрация заусенцев наблюдается в местах пересекающихся каналов, в прорезях, переходных сечениях и в зоне схода резьбы (рис. 5). Наряду с удалением заусенцев для



Рис. 4. Детали коммутационной техники:  
*a* – латунь (Л63); *б* – бронза (БрБ2); *в* – ковар (Fe-Ni-Co)

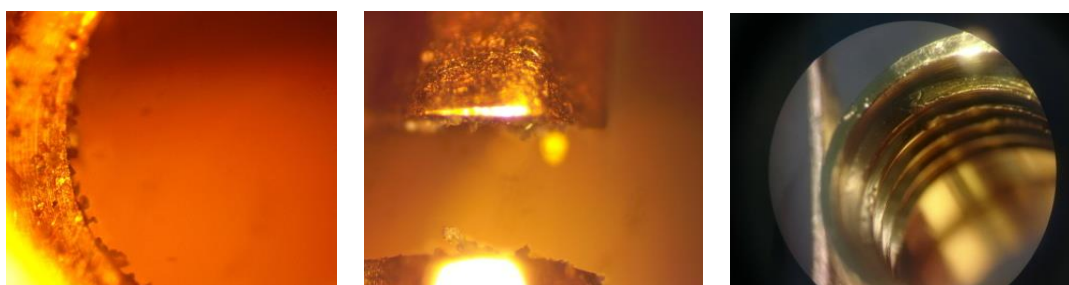


Рис. 5. Наиболее характерные зоны расположения заусенцев

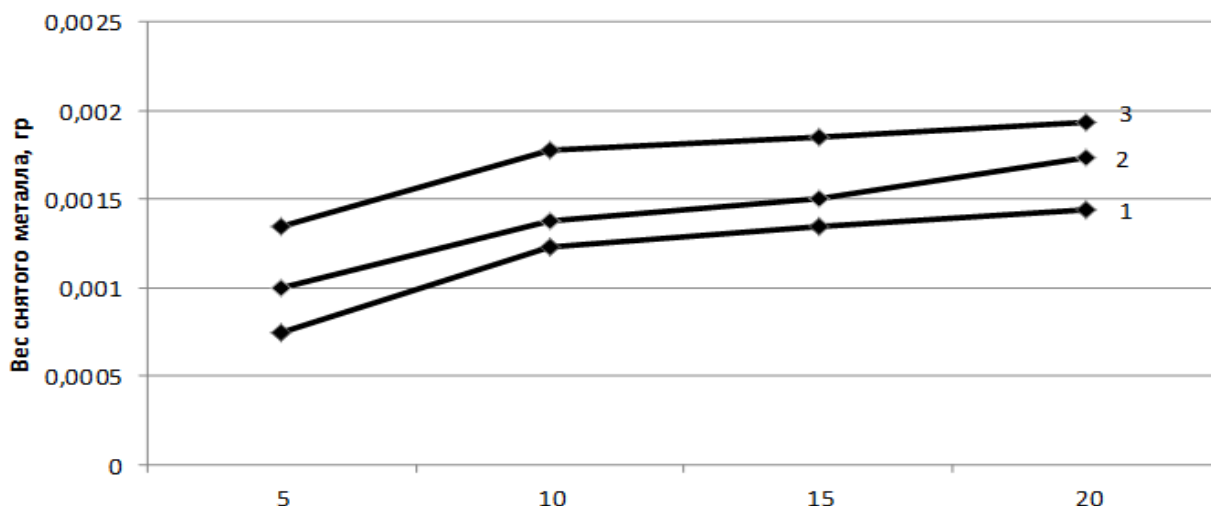
повышения качества обработки, является целесообразным притупление острых кромок деталей, этому также способствуют предлагаемые методы обработки и средства их интенсификации.

#### Результаты исследований

В ходе экспериментальных исследований по кавитационной обработке в качестве рабочей среды использовалась дистиллированная вода с активизирующими добавками в виде абразивных материалов и химически активных компонентов. Для обработки деталей, изготовленных из сплавов на основе меди (бронзы и латуни) химически активным компонентом был исключительно медный купорос. Величина избыточного гидростатического давления составляла 0,3 МПа, которая в ходе предварительного эксперимента была установлена как оптимальная для исследуемой номенклатуры деталей, исходя из анализа зависимости снижения массы партии деталей от этой величины, с использованием предлагаемой далее методики и лабораторного оборудования.

В качестве абразива на первом этапе эксперимента применялся электрокорунд различного гранулометрического состава. Такой подход обнаружил негативное влияние на поверхность деталей из исследуемых материалов вследствие увеличения шероховатости от соударения твердых частиц с поверхностью, имитирующей механизм гидроабразивного износа. Для устранения этого недостатка использовался

мелкодисперсный абразивный материал с меньшей твердостью, в частности, технический мел МТД-2 ТУ 5743-001-54653514-05, что позитивно отразилось на качестве поверхности и привело к сокращению времени обработки. Приведены зависимости потери массы одинаковых партий образцов (рис. 6, *a*) (по 4 шт. в партии, материал БрБ2), которые наглядно свидетельствуют о повышении эффективности при обработке деталей в двухфазной суспензии «вода + абразив (технический мел)» кривая 2 (рис. 6). Наибольшее увеличение скорости эрозии наблюдается при кавитационной обработке в водном 0,2 % (в массовом соотношении) растворе медного купороса  $\text{CuSO}_4$  кривая 3 (рис. 6). При этом поверхность детали в результате химической реакции приобретает золотисто-коричневый цвет. Учитывая, что данная деталь в последующем подвергается покрытию, изменение цвета не является негативным фактором и не влияет на качество и адгезию покрытия. При микроскопическом осмотре деталей наблюдалась более качественная обработка труднодоступных внутренних поверхностей, в том числе в пересекающихся каналах малого диаметра. Аналогичные результаты были получены для деталей, изготовленных из латуни (рис. 4, *б*), комбинация «двухфазная суспензия + медный купорос  $\text{CuSO}_4$ » экспериментальной проверке не подвергалась.



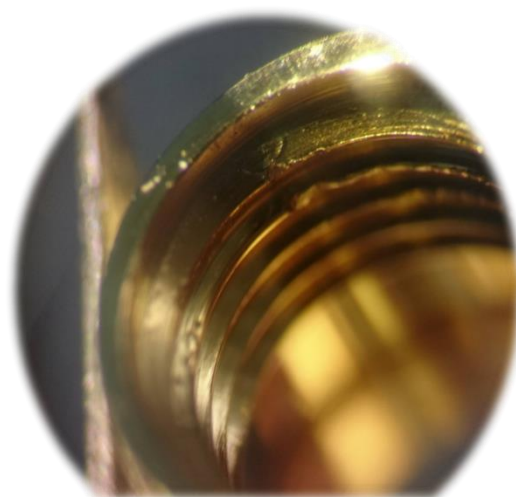
**Рис. 6. Зависимость потери массы деталей от времени обработки:**

1 – обработка в воде при избыточном давлении (0,3 МПа); 2 – обработка в двухфазной суспензии «вода + абразив»; 3 – обработка в химическом растворе медного купороса  $\text{CuSO}_4$

С точки зрения химического взаимодействия можно предположить, что при обработке бронзовых деталей происходит реакция сплава с сульфатом меди. Деталь приобретает золотисто-коричневый оттенок с малиновыми побежалостями. Это слой рыхлой меди на поверхности. Так как бронза – это сплав металлов и интерметаллических фаз с разными окислительно-восстановительными потенциалами, между ними возникает разница потенциалов, благодаря чему восстанавливается медь. При обработке деталей из латуни, вследствие химической реакции поверхностный слой лишается цинка, а поверхность латуни покрывается рыхлым слоем меди. Это может оказать благоприятное воздействие для дальнейшего нанесения последующих покрытий электролитическими методами, учитывая, что детали данного типа могут подвергаться многослойным покрытиям такими металлами, как серебро, медь, золото (Ag, Cu, Au).

Для деталей, изготовленных из ковара (рис. 4, в) наилучшие результаты были получены при обработке в двухфазной суспензии «вода + абразив (технический мел МТД-2)».

Представленные результаты наиболее характерны для удаления относительно мелких заусенцев. При наличии более крупных заусенцев (рис. 7) время обработки может быть увеличено до 30–40 мин. При этом заметного негативного влияния на поверхность детали при микроскопическом контроле не обнаружено [16]. В большинстве случаев их наличие не влияет на работоспособность изделия, поэтому их удаление не всегда является необходимым условием.



**Рис. 7. Деталь с характерными крупными заусенцами**

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований можно констатировать следующее:

1. Ультразвуковое кавитационное удаление заусенцев при избыточном гидростатическом давлении 0,3 МПа является наиболее оптимальным для обработки малогабаритных деталей исследуемой номенклатуры.

2. В качестве абразива при обработке исследуемых материалов в двухфазной суспензии «вода + абразив» для обеспечения требуемого качества поверхности детали (без увеличения шероховатости и даже возможном уменьшении) целесообразно использовать технический мел МТД-2. Данная среда предпочтительна при обработке деталей, изготовленных из ковара.



3. Для удаления заусенцев с поверхности деталей, изготовленных из сплавов на основе меди, (бронза БрБ2, латунь Л63) ультразвуковую кавитационную обработку целесообразно осуществлять в водном 0,2 % (в массовом соотношении) растворе медного купороса  $\text{CuSO}_4$ . При этом обеспечивается более качественное удаление трудно-

доступных внутренних поверхностей, в том числе в пересекающихся каналах малого диаметра.

4. Кроме удаления заусенцев с целью повышения качества обрабатываемых деталей применение ультразвукового воздействия одновременно обеспечивает притупление острых кромок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мощные ультразвуковые поля. М. : Наука, 1968. 266 с.
2. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. М. : Машиностроение. 2008. 320 с.
3. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М. : Машиностроение, 2002. 425 с.
4. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. М. : Наука, 2008. 271 с.
5. Шастин В.И., Коновалов Н.П. Технологическое обеспечение процессов лазерного модифицирования поверхностей конструктивных сплавов. Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2016. 164с.
6. Качество машин: справочник / А.Г. Сулов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. Т.1 М. : Машиностроение, 1995. 256 с.
7. Попов А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей. М. : Машиностроение, 1984. 88 с.
8. Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швегла Ш. Ультразвуковая обработка материалов. М. : Машиностроение, 1984. 280 с.
9. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев и др. Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2007. 400 с.
10. Витенько Т.Н. Гумницкий Я.М. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду // Химия и технология воды. 2007. Т. 29. № 5. С. 422–432.
11. Пат. 2359245 Рос. Федерация Способ определения кавитационной износостойкости / В.И. Шастин, А.М. Горовой. № 2007134795 ; заявл. 18.09.2007 ; опубли. 20.06.2009, Бюл. № 17.
12. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. II. Киев : ОКО, 2000. 898 с.
13. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М. : Химия, 1983. 192 с.
14. Шастин В.И., Каргопольцев С.К. Концепция микроуровневого анализа физико-механических свойств модифицированных поверхностей // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2 (26). С. 13–17.
15. Сухинина Е.В. Ермаков М.А. Ультразвуковое кавитационное удаление заусенцев с поверхности малогабаритных деталей // Молодой ученый. 2018. № 9 (195). С. 53–54.
16. Results of the Complex Studies of Microstructural, Physical and Mechanical Properties of Engineering Materials Using Innovative Methods / V.I. Shastin. et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 24. P. 15269–15272.

### REFERENCES

1. Rosenberg L.D. (ed.). Moshchnye ul'trazvukovye polya [Powerful ultrasonic fields]. Moscow: Nauka Publ., 1968, p.266.
2. Suslov A.G. (ed.). Inzheneriya poverkhnosti detalei [Engineering surface parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p.: ill.
3. Suslov A.G., Dalsky A.M. Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya [Scientific basis of engineering technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2002. 425с.
4. Syrotyuk M. G. Akusticheskaya kavitatsiya [Acoustic cavitation]. Moscow: Nauka Publ., 2008, 271 p.
5. Shastin V.I., Kononov N.P. Tekhnologicheskoe obespechenie protsessov lazernogo modifitsirovaniya poverkhnosti konstruktivnykh spлавov: monografiya [Technological support of the processes of laser modification of the surfaces of structural alloys: a monograph]. Irkutsk: INRTU Publ., 2016. 164 p.
6. Suslov A.G., Brown E.D., Vitkevich N.A. et al. Kachestvo mashin: spravochnik [The quality of machines: a guide]. In 2 vols. Vol.1. In Suslov A.G. (ed.). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1995, 256 p.
7. Panov A.P. Ul'trazvukovaya ochistka pretseziornykh detalei [Ultrasonic cleaning of precision parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984, 88 p.
8. Abramov O.V., Khorbenko I.G., Shveгла Sh. Ul'trazvukovaya obrabotka materialov [Ultrasonic treatment of materials]. In Abramov O.V. (ed.) Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p., II.
9. Khmelev V.N. et al. Ul'trazvukovye mnogofunktsional'nye i spetsializirovannye apparaty dlya intensifikatsii tekhnologicheskikh protsessov v promyshlennosti, sel'skom i domashnem khozyaistve [Ultrasonic multifunctional and specialized devices for the intensification of technological processes in industry, agriculture and household]. Biysk: Altai state tech. un-ty Publ., 2007. 400 p.
10. Viten'ko T.N. Gumnitsky Ya.M. Mekhanizm aktiviruyushchego deistviya gidrodinamicheskoi kavitatsii na vodu [The mechanism of the activating effect of hydrodynamic cavitation on water]. *Khimiya i tekhnologiya vody* [Chemistry and technology of water], 2007. Vol. 29, No. 5. Pp. 422-432.
11. Shastin V.I., Gorovoy A.M. *Sposob opredeleniya kavitatsionnoi iznosostoikosti* [The method of determining cavitation durability]. RF Patent No. 2359245; application number is 2007134795; applied 18.09.2007; reg. 20.07.2009.
12. Fedotkin I.M., Guliy I.S. Kavitatsiya, kavitatsionnaya tekhnika i tekhnologiya, ikh ispol'zovanie v promyshlennosti [Cavitation, cavitation methods and technology, their use in industry]. Part II. Kiev: OKO Publ., 2000. 898 p.
13. Novitsky B.G. Primenenie akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh [The use of acoustic vibrations in chemical and technological processes]. Moscow: Khimiya Publ., 1983. 192 p.
14. Shastin V.I., Kargapol'tsev S.K. Kontseptsyami mikrourovnevoogo analiza fiziko-mekhanicheskikh svoystv modifitsirovannykh poverkhnosti [The concepts of level analysis of the physical and mechanical properties of modified surfaces]. *Sistemy, Metody. Tekhnologii*. [Systems, Methods. Technologies]. 2015. No. 2 (26). Pp. 13-17



15. Sukhinina E.V., Ermakov M.A. Ul'trazvukovoe kavitatsionnoe udalenie zausentsev s poverkhnosti malogabaritnykh detalei [Ultrasonic and cavitation removal of burrs from the surface of small parts]. *Zhurnal Molodoi uchenyi* ['Young Scientist' Journal]. Irkutsk: IrGUPS Publ., No.9 (195) 2018. Pp. 53-54.

16. Shastin V.I., Kargapol'tsev S.K., Gozbenko V.E., Livshits A.V. and Filippenko N.G. Physical Analysis of Physical Engineering and Physical Engineering, *International Journal of Applied Engineering Research*. Volume 12, Number 24 (2017). Pp. 15269-15272.

### Информация об авторах

*Пермяков Александр Геннадьевич* – АО «Иркутский релейный завод», главный технолог, г. Иркутск, permykov\_ag@irzirk.ru

*Шастин Владимир Иванович* – к. т. н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kafedra-td@mail.ru

*Каргапольцев Сергей Константинович* – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ksk@irgups.ru

*Лившиц Александр Валерьевич* – д. т. н., профессор, проректор по научной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: livnet@list.ru

*Лгалов Владимир Владимирович* – АО «Иркутский релейный завод», зам. главного технолога, г. Иркутск, lgalovvv@irzirk.ru

### Authors

*Aleksandr Gennad'evich Permyakov* – AO Irkutsk Relay Plant, Chief Technologist, Irkutsk, permykov\_ag@irzirk.ru

*Vladimir Ivanovich Shastin* – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor at the Subdepartment of the Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kafedra-td@mail.ru

*Sergei Konstantinovich Kargapol'tsev* – Doctor of Engineering Science, Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ksk@irgups.ru

*Aleksandr Valer'evich Livshits* – Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Research, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: livnet@list.ru

*Vladimir Vladimirovich Lgalov* – AO Irkutsk Relay Plant, Deputy Chief Technologist, Irkutsk, lgalovvv@irzirk.ru

### Для цитирования

Пермяков А. Г. Удаление заусенцев с поверхности деталей коммутационной техники в ультразвуковом поле высокой интенсивности / А. Г. Пермяков, В. И. Шастин, С. К. Каргапольцев, А. В. Лившиц, В. В. Лгалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 33–40. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).33–40

### For citation

Permyakov A. G., Shastin V. I., Kargapol'tsev S. K., Livshits A. V., Lgalov V. V. Udaleniye zausentsev s poverkhnosti detalei kommutatsionnogo oborudovaniya v vysokointensivnom ul'trazvukovom pole [Removal of burrs from the surface of parts of switching equipment in a high-intensity ultrasonic field]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2, pp. 33–40. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).33–40

УДК 621.34

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).40–47

**А. А. Реутов**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Российская Федерация

Дата поступления: 03 апреля 2019 г.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МНОГОБЛОЧНЫХ ПРИВОДОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

**Аннотация.** В статье представлена разработанная компьютерная многомассовая динамическая модель движения ленты на приводных барабанах конвейера, позволяющая анализировать стационарные режимы работы приводов с унифицированными и неунифицированными приводными блоками, определять тяговые усилия и реализуемую мощность приводных блоков, оценивать скольжение и износ ленты на барабанах с учетом механических характеристик электродвигателя, ленты и контактного взаимодействия. Описана методика анализа движения ленты и работы привода, включающая оценку износа ленты и поверхности приводных барабанов через мощность силы трения скольжения дискретных тел ленты по поверхности приводных барабанов. Рассмотрены примеры моделирования двухблочного и трехблочного приводов с нерегулируемыми асинхронными электродвигателями и автоматическим натяжным устройством. Моделирование унифицированных приводных блоков показало, что при малом суммарном сопротивлении движению ленты последний приводной барабан создает самую большую силу тяги. При увеличении сопротивления движению распределение силы тяги между приводными барабанами изменяется, и наибольшую силу тяги создает первый приводной барабан. Применение в ленточном конвейере нескольких унифицированных приводных блоков приводит к неполному использованию их установленной мощности. Увеличение числа унифицированных приводных блоков не дает существенного роста суммарной реализуемой мощности и тягового усилия привода из-за ограниченной прочности ленты. Скорость скольжения ленты на приводных барабанах возрастает с увеличением сопротивления движению ленты. Суммарная мощность силы трения скольжения ленты на трех приводных барабанах меньше, чем на