

Влияние низкочастотных ультразвуковых колебаний на усилие расфиксации шпилечного соединения в элементах конструкций летательных аппаратов

© С.И. Минин, А.С. Хамицаев, А.В. Терехин,
Д.И. Чулков, А.А. Филатов

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»,
Обнинск, 249031, Российская Федерация

Рассмотрено влияние низкочастотных ультразвуковых колебаний на процесс расфиксации шпилек, установленных в соединяемую деталь на фиксатор резьбы. Представлены конструкции приспособлений для ввода ультразвуковых колебаний через торцевую и боковую поверхности расфиксируемой шпильки с применением магнитострикционного преобразователя. Показана определенная экспериментальным путем эффективность разработанных приспособлений ввода ультразвуковых колебаний при расфиксации шпилек $M8 \times 1,25$, установленных в элемент конструкции летательного аппарата на клеевую композицию ВАК-1Ф. Установлено, что нагрев, возникающий в процессе воздействия ультразвуковыми колебаниями частотой 22 кГц на клеемеханическое резьбовое соединение, не оказывает негативного влияния на элемент конструкции летательного аппарата и нанесенные на него защитные покрытия. При этом уменьшение момента расфиксации шпилек относительно расчетного значения составляет до 40 % при вводе ультразвуковых колебаний с торцевой поверхности и до 61 % при вводе ультразвуковых колебаний под углом к боковой поверхности шпильки.

Ключевые слова: *ультразвуковые колебания, расфиксация шпилек, фиксатор резьбы, момент расфиксации*

Введение. Для сборки элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА) широко применяются клеемеханические шпилечные соединения, обладающие высокой надежностью, технологичностью и прочностью [1, 2]. Для проведения ремонтно-восстановительных работ возникает необходимость разборки элемента конструкции ЛА, сопровождающейся расфиксацией клеемеханического резьбового соединения и последующим демонтажом шпилек.

При проведении ремонтно-восстановительных работ в основном осложняют разборку резьбовых соединений силы трения, препятствующие вращению крепежных элементов резьбового соединения [3, 4]. В случае клеемеханических резьбовых соединений (при использовании фиксаторов резьбы) коэффициент трения покоя увеличивается, что осложняет или вовсе делает невозможной разборку резьбового соединения ввиду разрушения крепежных элементов (например, разрушение шпильки в отверстии элемента конструкции ЛА при приложении момента для откручивания).

Для расфиксации клеемеханических резьбовых соединений (с фиксатором резьбы) их нагревают [5–7], что зачастую оказывает негативное влияние на другие конструктивные элементы изделий, в частности, нарушается лакокрасочное покрытие, деградируют прочностные характеристики клеевых соединений деталей, возникают остаточные механические напряжения и т. д. Эффективным методом расфиксации резьбовых соединений с минимальным негативным воздействием на соединяемые детали является ультразвуковая обработка [8–11], основанная на возбуждении в расфиксируемых элементах различных конструкций продольных, крутильных и сдвиговых ультразвуковых колебаний.

Цель работы — исследование изменения момента расфиксации шпильки, установленной в соединяемую деталь на фиксатор резьбы, при низкочастотной ультразвуковой обработке с помощью разработанных приспособлений для ввода ультразвуковых колебаний.

Принцип воздействия ультразвуковыми колебаниями на процесс расфиксации резьбовых соединений. Воздействие ультразвуковыми колебаниями на расфиксацию резьбовых соединений заключается в изменении условий контактного взаимодействия поверхностей элементов резьбового соединения, приводящем к снижению сил трения и разностным межэлементным силовым реакциям, уменьшающим момент, который необходим для расфиксации крепежного элемента в резьбовом соединении.

При низкочастотном ультразвуковом воздействии уменьшение момента расфиксации M_p резьбового соединения связано с активным разрушением когезионных и адгезионных связей и сокращением диаметральных размеров элементов резьбового соединения. При возбуждении колебаний в крепежном элементе (например шпильке), являющимся частью колебательной системы, поперечные деформации в один период колебаний увеличивают диаметральный размер, а в другой — уменьшают на ту же величину $\Delta d = \mu A$ (μ — коэффициент Пуассона материала крепежного элемента (шпильки), A — амплитуда ультразвуковых колебаний). В результате поперечной деформации шпильки механические напряжения в местах контакта в первый полупериод возрастают, а во второй — снижаются. Таким образом, наложение ультразвуковых колебаний приводит к снижению момента M_p , необходимого для расфиксации шпильки. При увеличении амплитуды колебаний величина M_p уменьшается [12–15].

Наряду с амплитудой на эффективность ультразвукового воздействия при расфиксации резьбовых соединений (в частности, установленной на фиксатор резьбы шпильки) влияет направление его введения в зону сопряжения деталей. Так, ввод ультразвуковых колебаний в резьбовое соединение шпильки и соединяемой детали возможен

с торцевой или боковой поверхности шпильки. Схемы ввода ультразвуковых волн в шпильку с помощью магнитострикционного преобразователя представлены на рис. 1.

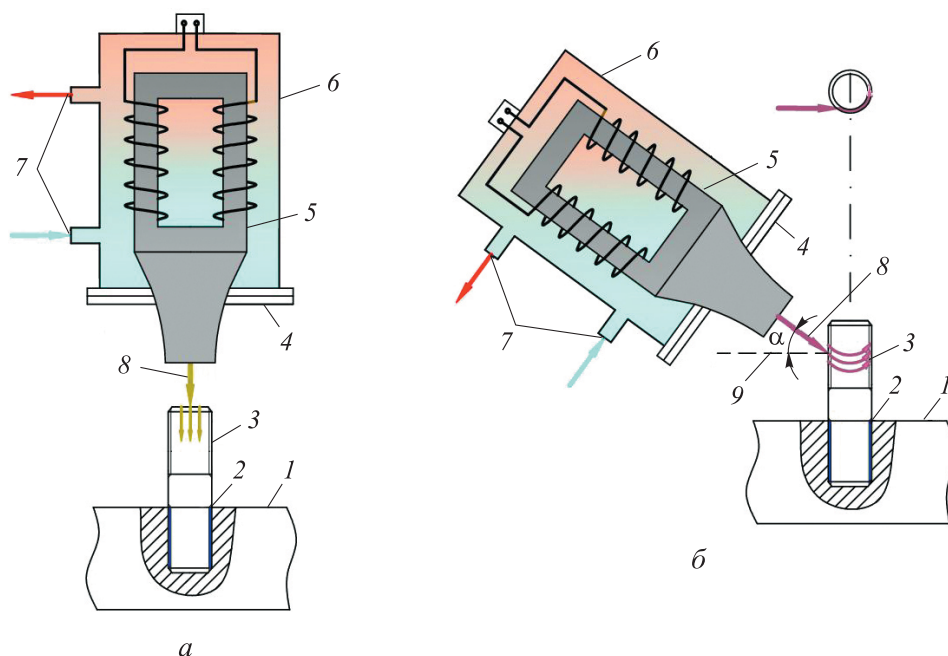


Рис. 1. Схема ввода ультразвуковых волн с помощью магнитострикционного преобразователя в резьбовое соединение шпильки и соединяемой детали с торцевой поверхности (а) и под углом к боковой поверхности (б) шпильки:

1 — соединяемая деталь; 2 — анаэробная клеевая композиция; 3 — шпилька; 4 — диафрагма; 5 — магнитострикционный преобразователь; 6 — корпус преобразователя; 7 — штуцеры для подачи и отвода охлаждающей жидкости; 8 — направление ввода ультразвуковых колебаний с торцевой поверхности шпильки; 9 — направление ввода ультразвуковых колебаний под углом α (угол наклона профиля резьбы) к боковой поверхности шпильки

При вводе ультразвуковых колебаний со стороны торцевой поверхности шпильки (вдоль оси) в резьбовом соединении будут возбуждаться преимущественно продольные (сжатия–расширения) ультразвуковые волны. В случае ввода ультразвуковых колебаний с боковой поверхности со смещением относительно оси шпильки наряду с продольными колебаниями в резьбовом соединении шпильки и соединяемой детали будут возбуждаться крутильные (имитирующие вращение шпильки вокруг своей оси) колебания, применение которых наиболее эффективно при расфиксации резьбовых соединений [7, 9].

Описание эксперимента. Экспериментальное исследование влияния низкочастотных ультразвуковых колебаний на момент расфиксации резьбовых соединений проводилось на шпильках М8×1,25, установленных в соединяемую деталь (элемент конструкции ЛА) с помощью фиксатора резьбы. В качестве фиксатора в рассматриваемом

резбовом соединении использовалась анаэробная клеевая композиция типа ВАК-1Ф [16]. Момент расфиксации, при котором начинаются разрушение слоя ВАК-1Ф и вращение шпильки, приближенно может быть определен по соотношению

$$M_p = \tau_{B1} \pi d^2 l = 7,85 \cdot 3,14 \cdot 6,647^2 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 18,5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1)$$

где τ_{B1} — прочность резьбового соединения при сдвиге с нанесенной и полностью отвержденной клеевой композицией ВАК-1Ф (по ТУ 1-596-121-85 $\tau_{B1} = 7,85$ МПа); d — средний диаметр резьбы М8×1,25; l — длина резьбовой части с анаэробной клеевой композицией ВАК-1Ф, вкрученной в соединяемую деталь.

Корректность расчетных значений момента расфиксации шпилек была подтверждена экспериментально, при этом отклонение экспериментально определенного (при откручивании установленных на ВАК-1Ф шпилек с помощью динамометрического ключа) момента расфиксации от расчетного составило не более 5 %.

Конструкции приспособлений, разработанных для создания ультразвуковых колебаний в рассматриваемом резьбовом соединении, позволяют вводить низкочастотные ультразвуковые колебания с торцевой (рис. 2, а) и боковой (рис. 2, б) поверхности шпильки.

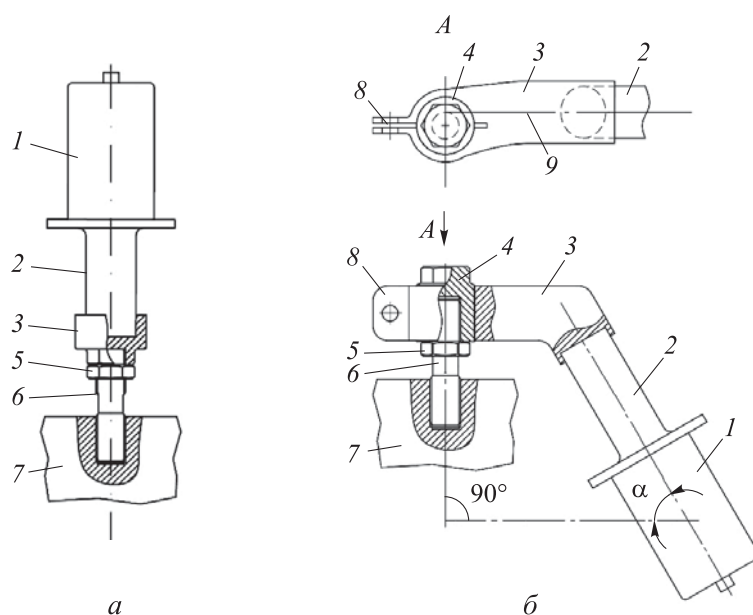


Рис. 2. Конструкция экспериментальных приспособлений, реализующих ввод низкочастотных ультразвуковых колебаний с торцевой (а) и боковой (под углом α) поверхности (б) шпильки:

1 — источник ультразвуковых колебаний; 2 — волновод ультразвукового преобразователя; 3 — волновод приспособления; 4 — цилиндрическая обойма с головкой под ключ; 5 — контргайка; 6 — шпилька; 7 — соединяемая деталь; 8 — проушины для стягивания цилиндрической обоймы; 9 — акустическая ось волновода ультразвукового преобразователя

Магнестрикционный преобразователь с резонансной частотой $22,0 \pm 0,5$ кГц, подключенный к ультразвуковому генератору (П10) мощностью 2 кВт, использовался в качестве источника ультразвуковых колебаний. Фотографии приспособлений с магнестрикционным преобразователем, установленных на исследуемых шпильках, представлены на рис. 3.

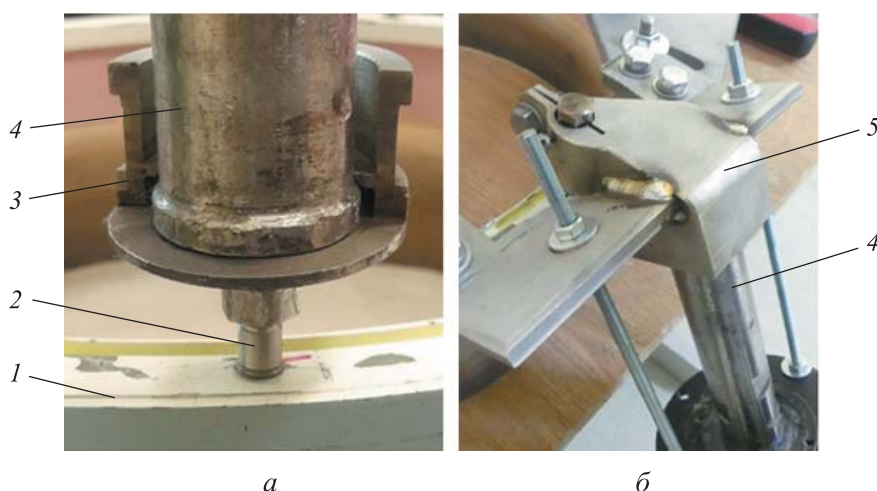


Рис. 3. Приспособления с магнестрикционным преобразователем, установленные на исследуемых шпильках, для ввода ультразвуковых колебаний в шпильку с торцевой поверхности (а) и под углом с боковой поверхности (б):

1 — соединяемая деталь; 2 — шпилька; 3 — приспособления для ввода ультразвуковых колебаний с торцевой поверхности шпильки; 4 — волновод; 5 — приспособления для ввода ультразвуковых колебаний под углом с боковой поверхности шпильки

Расфиксация рассматриваемых резьбовых соединений осуществлялась путем приложения крутящего момента к шпильке спустя 10 мин после начала низкочастотного ультразвукового воздействия. Для измерения крутящего момента использовался динамометрический ключ Hans Tools 417801-135. Значения экспериментально определенных (после ультразвукового воздействия) моментов M_p^{y3} расфиксации шпилек приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения моментов расфиксации шпилек после ультразвукового воздействия при вводе ультразвуковых колебаний с торцевой поверхности шпильки

Момент расфиксации	Номер шпильки					
	1	2	3	4	5	6
M_p^{y3} , Н·м	12,5	11,5	14,4	13,3	12,2	11,1
$\Delta M = (M_p - M_p^{y3})$, Н·м	6,0	7,0	4,1	5,2	6,3	7,4
$(\Delta M / M_p)$, %	32	38	22	28	34	40

Значения моментов расфиксации шпилек после ультразвукового воздействия при вводе ультразвуковых колебаний под углом к боковой поверхности шпильки

Момент расфиксации	Номер шпильки					
	7	8	9	10	11	12
M_p^{y3} , Н·м	7,5	11,9	7,1	8,1	10,5	11,0
$\Delta M = (M_p - M_p^{y3})$, Н·м	11,0	6,6	11,4	10,4	8,0	7,5
$(\Delta M / M_p)$, %	59	36	61	56	43	41

Сравнивая данные из табл. 1 и 2, видим, что применение ультразвуковых низкочастотных колебаний в процессе расфиксации шпилек М8×1,25, установленных в соединяемую деталь с помощью клеевой композиции ВАК-1Ф, при вводе ультразвуковых колебаний с торцевой поверхности приводит к снижению момента их расфиксации на 22...40 % (4,1...7,4 Н·м), а при их вводе под углом к боковой поверхности шпильки — на 36...61 % (6,6...11,4 Н·м).

Помимо измерения моментов расфиксации была проведена оценка температурного влияния низкочастотной ультразвуковой обработки на нагрев рассматриваемого резьбового соединения. Для этого с помощью термопар, закрепленных на элементах резьбового соединения, измерялась температура шпилек и соединяемой детали. Примеры графиков изменения температуры исследуемых резьбовых соединений при вводе ультразвуковых колебаний в шпильку с торцевой поверхности и под углом с боковой поверхности представлены на рис. 4.

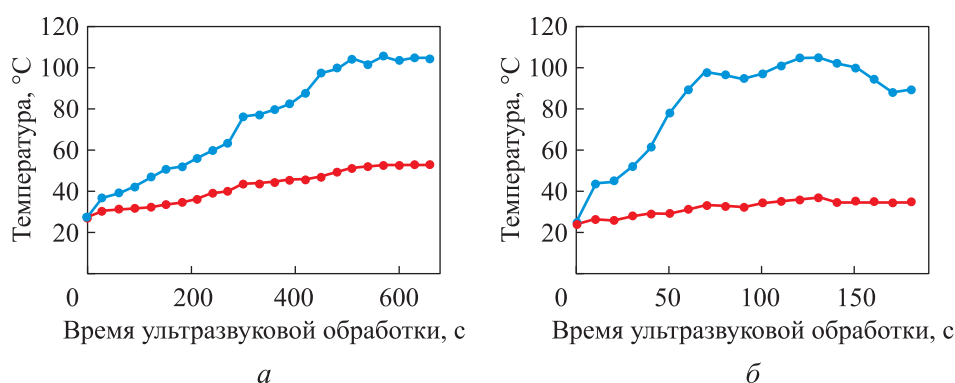


Рис. 4. Изменение температуры соединяемой детали (—●—) и шпильки (—●—) при вводе ультразвуковых колебаний под углом к боковой поверхности (а) и с торцевой поверхности шпильки (б)

На приведенных графиках видно, что в процессе низкочастотной ультразвуковой обработки резьбового соединения температура соединяемой детали и шпильки не превышают 53 °С и 105 °С соответственно, что не оказывает негативного воздействия на соединяемую деталь и нанесенные на нее покрытия и позволяет ее повторно использовать после расфиксации и выкручивания шпилек.

Заключение. Для ввода низкочастотных ультразвуковых колебаний в резьбовое соединение шпильки и соединяемой детали с фиксатором резьбы, осуществляемое с целью расфиксации шпильки, предложены конструкции приспособлений для ввода ультразвуковых колебаний с торцевой и боковой поверхности шпилек, а также предложены параметры ультразвукового генератора и преобразователя. Экспериментально проверена эффективность низкочастотной ультразвуковой обработки резьбового соединения для расфиксации шпилек М8×1,25, установленных в соединяемую деталь (элемент конструкции ЛА) с помощью клеевой композиции ВАК-1Ф. В процессе ультразвуковой обработки на соединяемую деталь не оказывается негативного влияния (температура в непосредственной близости к резьбовому отверстию не превышает 53 °С), а уменьшение момента расфиксации шпилек относительно расчетного значения ($M_p = 18,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$) при вводе ультразвуковых колебаний с торцевой поверхности достигает 40 %, а при их вводе под углом к боковой поверхности шпильки — 61 %, что свидетельствует об эффективности метода расфиксации резьбового соединения шпильки и соединяемой детали с клеевой композицией ВАК-1Ф ультразвуковыми волнами частотой 22 кГц и мощностью 2 кВт, а также позволяет снизить вероятность разрушения шпильки при расфиксации, обеспечивая при этом возможность повторного использования дорогостоящей соединяемой детали в конструкциях ЛА.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ромашин А.Г., Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. *Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания.* Харьков, ХАИ, 2003, 238 с.
- [2] Харитонов Д.В., Тычинская М.С., Анашкина А.А., Макаров Н.А., Лемешев Д.О. *Керамические материалы для авиации и космоса.* Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2022, 120 с.
- [3] Неверов А.Н. Исследование механизма самораскручивания резьбовых соединений при продольных ультразвуковых колебаниях. *Ученые записки физического факультета Московского университета*, 2017, № 5.
- [4] Неверов А.Н. *Ультразвуковая разборка резьбовых соединений.* Москва, МАДИ, 2012.
- [5] Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. *Вибрационное перемещение.* Москва, Наука, 1964.
- [6] Красков В.И., Терегулов Ф.Ш. *Ремонт резьбовых соединений.* Москва, 1994, 319 с.

- [7] Абрамов О.В. *Опыт применения ультразвука в процессах обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1980.
- [8] Казанцев В.Ф., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Применение ультразвуковых колебаний различной поляризации при проведении разборочных операций. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2016, № 12, с. 25–28.
- [9] Неверов А.Н. Использование крутильных и изгибных ультразвуковых колебаний для разборки резьбовых соединений. *Вестник МАДИ*, 2015, № 2, с. 15–20.
- [10] Фатюхин Д.С., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Сухов А.В. *Устройство для сборки и разборки резьбовых соединений*. Патент № 209808 от 23.03.2022 г.
- [11] Крылова И.А., Будников Ю.М., Шуваев В.Г. *Ультразвуковой гайковерт*. Патент № 188408 от 11.04.2019 г.
- [12] Вологдин М.Ф., Калашников В. В., Нерубай М. С., Штриков Б.Л. *Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке*. Москва, Машиностроение, 2002.
- [13] Казанцев В.Ф. *Физические основы технологического применения ультразвука*. Москва, МАДИ (ГТУ), 2008.
- [14] Приходько В.М. *Ультразвуковая разборка*. Москва, МГАДИ (ТУ), 1995, 94 с.
- [15] Тепляков, А.Ю. *Повышение эффективности сборки и разборки резьбовых соединений путем применения ультразвуковых колебаний*. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Самара, СГТУ, 2004, 20 с.
- [16] ТУ 1-596-121-85. *Композиция анаэробная ВАК-1Ф. Технические условия*.

Статья поступила в редакцию 11.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Минин С.И., Хамицаев А.С., Терехин А.В., Чулков Д.И., Филатов А.А. Влияние низкочастотных ультразвуковых колебаний на усилие расфиксации шпилечного соединения в элементах конструкций летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-4-2350>

Минин Сергей Иванович — д-р техн. наук, ведущий специалист научно-исследовательской лаборатории ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». e-mail: info@technologiya.ru

Хамицаев Анатолий Степанович — канд. техн. наук, первый заместитель директора НИК ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

e-mail: info@technologiya.ru

Терехин Александр Васильевич — канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». e-mail: info@technologiya.ru

Чулков Дмитрий Игоревич — инженер первой категории научно-исследовательской лаборатории ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». e-mail: info@technologiya.ru

Филатов Анатолий Анатольевич — инженер второй категории научно-исследовательской лаборатории ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». e-mail: info@technologiya.ru

Low-frequency ultrasonic vibration influence on the increasing stud connection release in the aircraft design elements

© S.I. Minin, A.S. Hamitsaev, A.V. Terekhin, D.I. Chulkov, A.A. Filatov

Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin
JSC, Obninsk, 249031, Russian Federation

The paper considers influence of the low-frequency ultrasonic vibration on the release process of studs installed in the connected part on the thread lock. It presents design of the devices to introduce ultrasonic vibrations through the release stud end and side surfaces using the magnetostrictive transducer. The experimentally found efficiency of the developed devices in introducing the ultrasonic vibrations with the release of the M8×1.25 studs installed in an aircraft structural element on the VAK-1F adhesive composition is shown. It is established that heating that appears during the action of ultrasonic vibrations with a frequency of 22 kHz on the adhesive-mechanical threaded joint is not negatively affecting the aircraft structural elements and the protective coatings applied to it. In this case, reducing the stud release moment relative to the calculated value is up to 40% when introducing the ultrasonic vibrations from the end surface, and is up to 61% when introducing the ultrasonic vibrations at an angle to the stud side surface.

Keywords: *ultrasonic vibrations, stud release, thread lock, release moment*

REFERENCES

- [1] Romashin A.G., Gaydachuk V.E., Karpov Ya.S., Rusin M.Yu. *Radioprozrachnyye obtekateli letatelnykh apparatov. Proektirovanie, konstruksionnye materialy, tekhnologiya proizvodstva, ispytaniya* [Radio-transparent fairings of the aircraft. Design, structural materials, production technology, testing]. Kharkov, KhAI Publ., 2003, 238 p.
- [2] Kharitonov D.V., Tychinskaya M.S., Anashkina A.A., Makarov N.A., Lemeshev D.O. *Keramicheskie materialy dlya aviatsii i kosmose* [Ceramic materials for aviation and space]. Moscow, RKhTU im. D.I. Mendeleeva Publ., 2022, 120 p.
- [3] Neverov A.N. Issledovanie mekhanizma samoraskruchvaniya rezbovykh soedineniy pri prodolnykh ultrazvukovykh kolebaniyakh [Study of the mechanism of auto-unwinding threaded connections with the longitudinal ultrasonic vibrations]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakulteta Moskovskogo universiteta — Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, 2017, no. 5.
- [4] Neverov A.N. *Ultrazvukovaya razborka rezbovykh soedineniy* [Ultrasonic disassembly of the threaded connections]. Moscow, MADI Publ., 2012.
- [5] Blekhtman I.I., Dzhanelidze G.Yu. *Vibratsionnoe peremeshchenie* [Vibratory displacement]. Moscow, Nauka Publ., 1964.
- [6] Kraskov V.I., Teregulov F.Sh. *Remont rezbovykh soedineniy* [Repair of threaded connections]. Moscow, 1994, 319 p.
- [7] Abramov O.V. *Opyt primeneniya ultrazvuka v protsessakh obrabotki metallov davleniem* [Experience in the use of ultrasound in metal forming processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980.
- [8] Kazantsev V.F., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. *Primenenie ultrazvukovykh kolebaniy razlichnoy polarizatsii pri provedenii razborochnykh*

- operatsiy [The application of ultrasonic vibrations with different polarizations in the implementation of deconstruction operations]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenie — Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-making*, 2016, no. 12, pp. 25–28.
- [9] Neverov A.N. Ispolzovanie krutilnykh i izgibnykh ultrazvukovykh kolebaniy dlya razborki rezbovykh soedineniy [The use of torsional and bending ultrasonic vibrations in disassembling the threaded connections]. *Vestnik MADI — Bulletin of MADI*, 2015, no. 2, pp. 15–20.
- [10] Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Sukhov A.V. *Ustroystvo dlya sborki i razborki rezbovykh soedineniy* [Device for assembling and disassembling the threaded connections]. Patent No. 209808 dated March 23, 2022.
- [11] Krylova I.A., Budnikov Yu.M., Shuvaev V.G. *Ultrazvukovoy gaykover* [Ultrasonic impact wrench]. Patent No. 188408 dated April 11, 2019.
- [12] Vologdin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubay M.S., Shtrikov B.L. *Primenenie ultrazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke* [The use of ultrasound and explosion in processing and assembly]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002.
- [13] Kazantsev V.F. *Fizicheskie osnovy tekhnologicheskogo primeneniya ultrazvuka* [Physical foundations of the ultrasound technological application]. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2008.
- [14] Prikhodko V.M. *Ultrazvukovaya razborka* [Ultrasonic disassembly]. Moscow, MGADI (TU) Publ., 1995, 94 p.
- [15] Teplyakov A.Yu. *Povyshenie effektivnosti sborki i razborki rezbovykh soedineniy putem primeneniya ultrazvukovykh kolebaniy. Avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk* [Increasing the efficiency of assembly and disassembly of threaded connections by using the ultrasonic vibrations. Author abstract ... Diss. Cand. Sc. (Eng.). Samara, SGTU Publ., 2004, 20 p.
- [16] TU 1-596-121-85. *Kompozitsiya anaerobnaya VAK-1F. Tekhnicheskie usloviya* [Anaerobic composition VAK-1F. Technical conditions].

Minin S.I., Dr. Sc. (Eng.), Leading Specialist, Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@technologiya.ru

Khamitsaev A.S., Cand. Sc. (Eng.), First Deputy Director, Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@technologiya.ru

Terekhin A.V., Cand. Sc. (Eng.), Head of the Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@technologiya.ru

Chulkov D.I., Engineer of the First Category, Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@technologiya.ru

Filatov A.A., Engineer of the Second Category, Research Laboratory, Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC.
e-mail: info@technologiya.ru