

Гений ортопедии. 2023;29(5):565-573.

Genij Ortopedii. 2023;29(5):565-573.



Обзорная статья

УДК 616.728.2-089.843-77:531.43

https://doi.org/10.18019/1028-4427-2023-29-5-565-573

«Шум керамики» как нежелательное явление в эндопротезировании тазобедренного сустава

Б.Р. Таштанов^{1✉}, И.А. Кирилова¹, Д.В. Павлова², В.В. Павлов¹¹ Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна, Новосибирск, Россия² Новосибирский государственный медицинский университет, Новосибирск, Россия**Автор, ответственный за переписку:** Байкозхо Рустамович Таштанов, b.tashtanov95@gmail.com

Аннотация

Введение. Керамическая пара трения в эндопротезировании тазобедренного сустава в общемировой ортопедической практике зарекомендовала себя как износостойкий и биоинертный материал. Последние два поколения керамики «Bioloх Forte» и «Bioloх Delta» значительно повысили свою прочность. Однако появление шума в паре трения стало непредвиденным последствием ее эксплуатации в XXI веке при эндопротезировании тазобедренного сустава. **Цель.** Оценить современное состояние проблемы шума в керамической паре трения эндопротеза тазобедренного сустава на основании анализа зарубежной и отечественной литературы. **Материалы и методы.** В представленном обзоре проведен анализ зарубежной и отечественной литературы согласно рекомендациям PRISMA в открытых электронных источниках научной литературы PubMed, Scopus, Google Scholar, eLibrary. Оценивалось методологическое качество статей путем рекомендации MINOR. **Поисковые слова:** керамическая пара трения, скрип, эндопротезирование тазобедренного сустава, ceramic bearing, ceramic on ceramic, ceramic squeaking, hip. **Результаты и обсуждение.** Шум в керамической паре трения, по данным опросов, составляет до 37,7 %. Есть множество теорий возникновения и механизма шума: импиджмент и нагрузка на край вкладыша, нарушение пленки, третье тело, микросепарация и резонанс. Однако по сей день нет единого мнения, чем является шум в керамической паре трения и как решить данную проблему. **Заключение.** Проведя анализ литературы, посвященной керамической паре трения, было обнаружено достаточное количество нерешенных вопросов. Шум может сыграть роль предиктора нарушений в эксплуатации эндопротеза, что при накоплении базы данных приведет к более глубокому пониманию шума, методов его коррекции и, возможно, к своевременному предотвращению риска раскола керамики.

Ключевые слова: эндопротезирование, керамическая пара трения, шум в керамике, скрип в керамике

Для цитирования: Таштанов Б.Р., Кирилова И.А., Павлова Д.В., Павлов В.В. «Шум керамики» как нежелательное явление в эндопротезировании тазобедренного сустава. *Гений ортопедии*. 2023;29(5):565-573. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-565-573. EDN: ALTQWQ.

Review article

Ceramic-related noise as an adverse outcome in total hip arthroplasty

B.R. Tashtanov^{1✉}, I.A. Kirilova¹, D.V. Pavlova², V.V. Pavlov¹¹ Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics n.a. Ya.L. Tsivyan, Novosibirsk, Russian Federation² Novosibirsk State Medical University, Novosibirsk, Russian Federation**Corresponding author:** Baikozho R. Tashtanov, b.tashtanov95@gmail.com

Abstract

Introduction Ceramic hip replacement bearings have shown to be low wearing and biocompatible. The last two generations of Bioloх Forte and Bioloх Delta ceramics have established themselves as durable bearings. However, squeaking and noise from ceramic bearing THRs is well recognised in the 21st century. **The objective** was to explore the problem of noise in the ceramic bearing of THA based on the analysis of the foreign and Russian literature. **Material and methods** In presented the analysis of Foreign and Russian literature searches for the review were produced according to PRISMA recommendations using PubMed, Scopus, Google Scholar, eLibrary. MINOR was used to assess the methodological quality of articles. **Results and Discussion** Noise in ceramics is observed in 37.7 %. There are many theories on the origin and mechanism of noise including liner impingement and loading, film disruption, third body, microseparation and resonance. However, there is still no consensus on what is noise in the ceramic bearing and how to solve this problem. **Conclusion** Literature review of ceramic bearing indicated enough unanswered questions. The noise may play a role as a predictor of improper use of endoprosthesis with accumulated database resulting in better understanding of the phenomenon, methods of the correction and timely prevention of ceramic breakage.

Keywords: total hip arthroplasty, ceramic bearing, noise in ceramics, squeaking in ceramics

For citation: Tashtanov B.R., Kirilova I.A., Pavlova D.V., Pavlov V.V. Ceramic-related noise as an adverse outcome in total hip arthroplasty. *Genij Ortopedii*. 2023;29(5):565-573. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-565-573

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой медицине операция эндопротезирования тазобедренного сустава (ЭТБС) достаточно хорошо зарекомендовала себя и востребована. На данный момент замена сустава выполняется молодым пациентам, начиная с возраста 18-30 лет [1]. По сей день одной из основных нерешенных задач ЭТБС является износ компонентов пары трения, преимущественно полиэтилена, и лизис окружающей костной ткани [2, 3]. В связи с этим в 1971 году ортопедом Boutin P. была предложена пара трения «керамика – керамика», а в 1975 году керамическая пара от производителя «Ceramtec» была

впервые имплантирована пациенту [4]. К сожалению, первые модели данной пары были отклонены большей частью хирургического сообщества в связи со своей хрупкостью, что не остановило исследователей, и уже к 1993 году была произведена «Bioloх Forte» 3-го поколения [5]. Среднесрочные результаты пользования данной керамики были хорошие, тем не менее, процент осложнений в виде раскола и шума оставался высоким [6]. Это мотивировало исследователей, и в 2003 г. последовала керамика 4-го поколения из алюминоксид-циркониевого композита с добавлением диоксида циркония 18 %, ок-

сида стронция 1 %, оксида хрома 1 % [7]. Созданная современная керамика описывается как биоинертный и износостойкий материал [8, 9]. Поколение «Bioloх Delta» проявило себя отлично в среднесрочный период [10, 11]. Так, раскол керамических головок значительно снизился [10, 12], но раскол вкладыша оставался на таком же уровне, составляя до 0,03 % [13]. В процентном соотношении результаты могут показаться клинически не значимыми, но последствия раскола керамики катастрофичны по следующей причине [9, 11] – керамические компоненты пары трения, разрушенные по тем или иным причинам, не рекомендуются менять на иные, менее хрупкие материалы, а следует вновь вернуться к керамической паре трения, в связи с тем, что керамический дебрис и третье тело, остающиеся в окружающих мягких тканях в результате раскола, в дальнейшем могут проникнуть в трущуюся поверхность пары трения и разрушить ее, если она мягче, чем керамика [11, 14, 15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данный обзор был проведен в соответствии рекомендациям PRISMA [20]. Поиск источников проводился в открытых электронных базах данных научной литературы PubMed, Scopus, Google Scholar, eLibrary. Поиск осуществлялся ключевыми словами и словосочетаниями: в англоязычных базах – (ceramic bearing[Title/Abstract]) or (ceramic on ceramic[Title/Abstract]) or (ceramic squeaking[Title/Abstract]) and (hip [Title/Abstract]) и в русскоязычной базе – керамика, скрип, эндопротезирование. Литература была проанализирована двумя независимыми рецензентами: первый этап включал отбор по названию и аннотации. Глубина поиска составила 20 лет с ретроспективой до 2002 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа литературы показали, что шум в керамике составляет до 36 % [22-26]. Частота шума в керамике 3-го поколения составила 2,4 % [27]. В последнем мета-анализе керамики 4-го поколения статистика шума составила в среднем 3 % [28]. Было предложено множество вариантов причин возникновения шума, однако исследования доказывают, что его природа многофакторная [6, 29]. Впрочем, факторы классифицируют на три категории: хирургические, связанные с пациентом, связанные с имплантатом [6].

Хирургические факторы

Некорректное позиционирование компонентов. Анализ литературы указывает, что пациенты, предъявляющие жалобы на шум в эндопротезе тазобедренного сустава, имеют избыточную или недостаточную антеверсию или инклинацию компонентов выше 45 градусов [22, 25, 28, 30-32]. В противовес, другие исследования не обнаружили подобной связи с ориентацией вертлужного компонента [27, 33-36]. Медиализация или латерализация центра вращения вертлужной впадины, по мнению Castagnini F. и Sexton S., также вносит свой эффект в генез шума, нарушая пятно контакта [29, 31, 37].

До 2005 года шум в керамической паре трения эндопротеза тазобедренного сустава не считался клинически значимым осложнением [6]. В настоящее время требования пациентов возросли, и запросы на ощущение искусственного сустава, как естественного, можно услышать все чаще [16]. Описано множество факторов, провоцирующих шум в керамической паре, но существуют шумы и при относительно правильном, пространственно сориентированном положении компонентов протеза [17, 18], которые значительно ухудшают качество жизни пациентов [18]. По результатам исследования Owen D.H. и соавт., частота ревизионных вмешательств по поводу шумов составляет 0,2 % [19]. Таким образом, шум стал непредвиденным клиническим результатом и нежелательным явлением XXI века в эндопротезировании тазобедренного сустава (ТБС) [6].

Цель – оценить современное состояние проблемы шума в керамической паре трения эндопротезов тазобедренного сустава на основе анализа зарубежной и отечественной литературы.

Критерии включения: литература любого уровня доказательности в свободном доступе полного текста на русском и английском языках, сфокусированная на шуме керамической пары трения эндопротезов ТБС.

Критерии исключения: обзоры, мнения экспертов, главы книг, тезисы конференций, случаи из практики и исследования на русском и английском языках. Исследования с наблюдением менее 5 лет.

Вторым этапом проведен анализ полных текстов соответствующих исследований. Оценивалось методологическое качество статей путем MINOR (Methodological Index for Nonrandomized Studies) [21].

Недосаженный вкладыш. Неплотно установленный, перекошенный вкладыш обуславливает не только высокие риски возникновения шума в протезированном суставе, но и риски раннего его разрушения в связи с микромобильностью в контакте поверхностей между вкладышем и вертлужным компонентом, в результате происходит формирование второй пары трения между вкладышем и чашкой [6, 35]. Причиной ранних разрушений керамики в виде сколов после установки может быть аналогичная ситуация, которая была продемонстрирована в лабораторных условиях, где недосаженные вкладыши были более подвержены расколу, чем плотно установленные. [38].

Винты. В положении экструзии ацетабулярные винты могут соприкасаться с задней поверхностью вкладыша и, тем самым, быть причиной либо шума, либо микротрещин во вкладыше [39-41].

Факторы, связанные с пациентом

Возраст. Отчеты показывают, что молодые, высококорослые и активные пациенты больше подвержены шуму [29]. Siddhard M.S. и соавт. в проспективном когортном исследовании получили статистически значимую разницу в возрасте у пациентов с шумом

и без него [22]. Авторы объясняют данные результаты связью между большей активностью и физическими возможностями у молодых.

ИМТ. В исследовании Walter W.L. и соавт. демографические данные показали, что появление шума более вероятно у пациентов с высоким весом и ростом [6, 27]. К тому же у пациентов с массой тела больше 91 кг вероятность раскола керамики была выше в 4,76 раза, чем у пациентов с меньшим весом [42, 43].

Пол. Choi I.Y. и соавт. обнаружили, что пол является фактором, влияющим на возникновение шума. В исследовании сообщается, что мужчины больше predisположены к шуму [36, 44]. Это может быть связано, опять же, с их высокой физической активностью.

Сопутствующие патологии нижних конечностей. Невосстановленная длина нижних конечностей грозит такими осложнениями как мышечный дисбаланс, импиджмент, тенденцией к вывиху и смещению пятна контакта. McDonnell S.M. и соавт. в своем исследовании пришли к выводу, что шум встречается больше у пациентов с избыточным диапазоном движений, который связан с мышечным дисбалансом [23]. Избыточное движение может привести к микросепарации или краевой нагрузке, что лежит в основе механизма возникновения шума [23, 45]. McDonnell S.M. отметил, что атрофия мышц и широкий диапазон движений значительно увеличивают риск появления шума [23]. Ревматоидный артрит также может быть фактором риска возникновения шума, хотя связь с ним трудно объяснить [46].

Последствия переломов керамических компонентов. Основная проблема заключается в распространении в результате раскола мелких острых частиц керамики в мягкие ткани, удаление которых во время ревизии невозможно [47, 48]. Последствия перелома керамических компонентов будут сказываться и на последующих имплантациях протезов, проявляясь в виде эффекта третьего тела [49, 50]. Но есть и противоположное мнение – в отличие от вышеупомянутых исследований, Keurentjes J.C. и Restrepo C. не обнаружили корреляции между шумом и отмеченными выше факторами [34, 35].

Факторы, связанные с имплантатом

Размеры компонентов. Как известно, размеры компонентов в паре трения керамики не увеличивают износ [51]. В связи с этим многими авторами было рекомендовано использовать большие головки для уменьшения рисков вывиха за счет увеличения дистанции прыжка. Однако последние исследования показали, что при использовании больших размеров компонентов пар трения риск возникновения шума выше [18, 44], что увеличивает, соответственно, риск раскола. Как показали первые пятилетние результаты Австралийского регистра, частота ревизий протезов с большими головками не меньше, чем частота ревизий протезов с головками 32 размера [52]. Thomas и соавт. в своем сравнительном проспективном исследовании сообщили, что частота шума при использовании головок 36 мм составила 13,5 %, а при использовании протезов с головками 28 мм – 5,9 %, но при этом сделали заключение, что размер головки как единственный предиктор не влияет на исход, а только

в сочетании с несколькими другими факторами (предикторами) [53]. Большие головки также увеличивают краевое давление на вкладыш при более вертикальной установке чашки, создавая условия для возникновения шума. Размеры компонентов могут, в том числе, увеличить массу протеза, тем самым снизить собственную частоту вибраций компонентов, увеличить амплитуду и еще больше усилить начальную вибрацию, что приведет к появлению шума [18].

Различия технологической заводской сборки и мануальной интраоперационной сборки. Частота шума в группе с установленной чашкой «Delta Motion» с технологической сборкой на заводе была значительно выше по сравнению с керамическими парами трения, скомпонованными во время операции [28]. Применение чашек «Pressfit Delta Motion» увеличило частоту возникновения шума. Это гипотетически может быть связано с тем, что в данных чашках невозможно фиксировать тазовый компонент винтами, в связи с чем возникает расшатывание тазового компонента, что, в свою очередь, может изменить положение компонентов. Parvizi J. заметил, что чашки с высоким краем больше подвержены шуму, когда край керамического вкладыша выступает выше края чашки [54]. Stanat S.J., напротив, не смог обнаружить в своем мета-анализе связь между шумом и выступающим высоким краем керамического вкладыша [27].

Особенности дизайна бедренного компонента (офсет и толщина шейки). В исследованиях Swanson T.V. и Wu G.L. сообщается о том, что «Stryker Accolade» были больше подвержены шуму, нежели другие, что может быть связано с короткой шейкой, а, соответственно, с офсетом бедренного компонента [46, 55, 56]. Толстые шейки более подвержены соударению (импиджменту) с краем вкладыша, особенно при выборе головки бедренного компонента диаметром 28 мм. Таким образом, в исследовании Kim H.S. и соавт. статистика соударения составила 10 %, что чрезвычайно много для керамики. Однако примечательно, что в группе с соударением не было расколов вкладыша за 10 лет наблюдения, но из 27 «шумящих» протезов 21 имел 28 мм головку и толстую шейку бедренного компонента [57].

Также было проведено исследование на связь шума с моделями и производителями имплантатов. В результате самыми «шумными» эндопротезами оказались «Stryker Accolade» и «De puy Summit» [27, 28, 46]. Это может быть связано как со скошенным проксимальным отделом – «Мюллер», так и с философией проксимальной фиксации. Помимо этого, в нескольких исследованиях сообщается, что шум может быть связан с низкопрофильными бедренными компонентами и тонкой шейкой [17, 33, 34]. Fan N. и соавт. провели *in vitro* исследование и продемонстрировали, что более жесткие и короткие бедренные компоненты имеют более высокий критический коэффициент трения, что коррелирует с клиническими данными [58]. Следует отметить, что в мета-анализе Lee T.H., куда были включены 132 исследования шума, единственным значимым фактором являлся угол инклинации ацетабулярного компонента [59].

Материалы компонентов. Из исследования известно, что расшатывание бедренного компонента может продуцировать абразив, который, попадая в трущуюся поверхность, нарушает смазочные свойства пары трения, что в дальнейшем может вызвать шум [54, 60]. Авторы сообщают, что «Stryker Accolade» имеет более гибкую структуру, что было отмечено положительно для уменьшения боли в бедре [56]. Однако, в связи со своей гибкостью, он имеет больший потенциал к резонансии [28, 56]. Restrepo С. и соавт. предположили, что сплав металлов эндопротеза влияет на продукцию шума, возможно, в связи с различием проводимости вибрации [56].

Патогенез шума в керамике

Теории механизма шума разнятся. Одни исследования указывают, что шум является следствием аномального трения. Другие выдвигают гипотезу резонанса компонентов при нормальном трении [61, 62].

Импиджмент и нагрузка на край вкладыша. Шум может быть продуктом соударения шейки бедренного компонента о керамический край вкладыша. Также импиджмент может быть причиной третьих тел, если металлический край чашки не перекрывает керамический край вкладыша [63]. В исследованиях было продемонстрировано, что в извлеченных ацетабулярных компонентах по внутреннему краю отмечались следы регулярного соударения. Следовательно, соударение в момент движения могло сместить головку из центра к краю, что увеличило давление между парой трения, сместив пятно контакта и вектор силы [8, 28]. При этом тонкая жидкая пленка разрушается, и это приводит к эффекту сухого трения. Отличительным признаком краевой нагрузки является наличие полос износа в компонентах [32]. Для оценки краевой нагрузки рекомендуют смотреть на расстояние от пятна контакта до края вкладыша (CPR), так как многие авторы заметили прямую корреляцию наличия шума и уменьшения CPR [32]. Другие исследования указывают на то, что импиджмент мог возникать у пациентов только при подъеме со стула или при подъеме по лестнице. При таких движениях, когда человек остается только на одной опорной конечности, давление в трущейся поверхности значительно увеличивается [64]. Но при этом стоит уточнить, что интенсивность износа не увеличивается даже при порочном положении [65]. Данное положение – это предиктор риска развития шума и взрывного разрушения керамики. В исследовании Walter W.L. и соавт. изучили 12 керамических компонентов, извлеченных при ревизии у пациентов с жалобами на шум, и все компоненты имели признаки краевого износа. Толщина износа была 94 мкм, по сравнению с пациентами без шума, составляющего 72 мкм. Эта разница была незначительной. Однако Walter W.L. и соавт. в исследовании сообщили, что в проведенном эксперименте путем воспроизведения положения некорректно установленного вертлужного компонента выявлено отклонение вкладыша от чашки, которое составляло 40 мкм. Данная подвижность также может быть причиной шума [6]. В исследовании продемонстрировано,

что нагрузка на передний край вкладыша может быть связана с избыточной антеверсией и инклинацией вертлужного компонента, при этом нагрузка на задний край вкладыша снижается [64]. Данный механизм считается одной из причин диссоциации вкладыша от ацетабулярного компонента [66]. При этом было установлено, что задневерхняя краевая нагрузка возникает в 4 раза чаще, чем передневерхняя [23]. Последние исследования активно изучали функциональную ориентацию ацетабулярного компонента, и было выяснено, что компоненты требуют индивидуального подбора углов антеверсии и инклинации при использовании керамической пары трения в соответствии с философией кинематического эндопротезирования [67, 68].

Нарушение пленки. На разрушение синовиальной пленки в трибологической паре может влиять избыточное давление в пятне контакта, что бывает при высоком ИМТ и при некорректной установке компонентов [69]. Недостаточность вещества для уменьшения трения поверхностей при использовании больших диаметров может увеличить риск вибрации, тем самым вызывать шум [70]. Жидкая пленка, выполняющая роль смазки, требует довольно тонкого баланса ряда факторов, к которым относятся скорость скольжения (1), вязкость смазочной жидкости (2), шероховатость поверхностей (3), зазор (4), контактное давление – пятно (5) [71]. Также шум может свидетельствовать о нарушении жидкой пленки вследствие высокого коэффициента трения [71]. Нарушение смазки жидкой пленкой может произойти в результате краевой нагрузки (уменьшение площади контакта) и появления третьих тел (фрагменты керамики) в трибологической паре [49].

Третье тело. При исследовании извлеченных керамических компонентов у пациентов с жалобами на шум были обнаружены полосы износа. Toni A. и соавт. при пункции зоны искусственного сустава у пациентов с жалобами на шум обнаружили в аспиратах высокий показатель частиц керамики. Это может свидетельствовать о наличии третьего тела [49, 72]. Lucchini S. и соавт. предложили гипотезу многоступенчатого раскола керамики, предполагая, что раскол – это не одномоментное событие, а следствие длительного процесса [12], течение которого, теоретически, можно прогнозировать.

Микросепарация. Другой теорией появления полос износа является микросепарация [45]. Использование больших головок в последние годы становится популярнее. Однако это может быть причиной микросепарации между головкой и чашкой вследствие небольшого угла раскрытия, что в дальнейшем может привести к постоянным микросоударениям в паре и, соответственно, появлению шума [73].

Резонанс. В момент движения вращательная сила превышает статическую силу в паре трения, что приводит к ускорению одной суставной поверхности по отношению к другой. Это служит причиной возникновения вибрации керамических компонентов [6]. Последние исследования показали, что как ацетабулярный, так и бедренный компонент играют роль осциллятора вибрации [6]. Резонанс не возникает, если частота колебаний не соответствует частоте компо-

нента. Как сообщили Fan N. и соавт., частота шума керамики составляет 400-7500 Гц [6, 58]. Был проведен модальный анализ для лучшего понимания резонанса компонентов, в результате которого обнаружено, что керамический вкладыш с чашкой изолированно не могут резонировать, но керамическая головка с бедренным компонентом показали резонанс в нескольких режимах и плоскостях [6]. Металлический состав и дизайн имплантата, как уже было сказано выше, могут влиять на шум. И это указывает на то, что частота колебаний компонентов эндопротезов в данном диапазоне находится с шумами на одном и том же уровне [62]. Таким образом, металлические компоненты являются усилителями колебаний [74].

Свойства шумов

По данным источников литературы, в качестве шума описывается стук, щелчок, скрежет, скрип. В ряде случаев все слышимые звуки интерпретируются как скрип. В дополнение к этому скрип, из всех описанных шумов, является наиболее частым [22, 27]. Авторы сообщают, что частота ревизий в связи со скрипом составляет 0,2 % [19]. Скрип описывают как высокочастотный и хорошо слышимый звук, который уникален для керамики [28]. Он часто безболезненный, но все же влияет на качество жизни. Более того, шумы могут быть указателями несоответствия чего-либо в установленном эндопротезе [28]. Впервые шумы в парах трения были изучены и описаны в 2008 году [73]. Glaser D. и соавт. одними из первых подробно описали характеристики шума и их классификацию.

Стук (щелчок) – определяют как признак нагрузки, представляющий собой временные импульсы короткой длительности и высокой амплитуды (наподобие высокотоновой ноты) [73]. Такой звук можно идентифицировать у пациентов при разобщении головки и впадины, что может произойти при наличии люфта [73]. Schroder D. и соавт. в своем исследовании сообщили, что наиболее распространенным шумом был не скрип, а щелчок [75]. Аналогичная тенденция наблюдается и в других исследованиях [17, 33].

Скрип – определяется как высокочастотный слышимый звук, возникающий в результате принудительной вибрации, создаваемой движущей силой, что приводит к динамической реакции [6]. Он наблюдается при интенсивном, скользящем движении между головкой и впадиной в полном контакте [73]. Shah M.S. и соавт. в результате своего исследования показали, что скрип является наиболее частым видом шума, который составляет половину шумов – 7,7 из 14,7 % [22].

Хруст – такой шум чаще всего свидетельствует о расколе керамических компонентов [49]. Механизм заключается в образовании мелкого и твердого, к тому же трущегося между керамическими компонентами абразива. Это говорит о появлении абразивного шума, который можно сравнить со звуком трения песка о стекло. Данный шум должен быть установлен в срочном порядке, чтобы не допустить распространения частиц в окружающие мягкие ткани, которое возникает в результате двигательной активности пациента [76].

Природу шума допустимо классифицировать на два типа. Авторы недавно проведенного экспериментального исследования на появление шумов в трех разных условиях окружающих тканей (в сухом трении, воде и плазме крови) обнаружили, что при стандартном наклоне ацетабулярного компонента, соответствующего ISO 14242-1, высокочастотный шум возник лишь при сухом трении, что говорит о появлении адгезивного шума. При тех же заданных условиях, но при изменении краевого наклона, соответствующего ISO 14242-4, слышимые звуки появились везде.

Сухие условия в испытаниях являются несоответствующими при оценке скрипа керамики, так как шум будет генерироваться при любых ее углах. Было продемонстрировано, что шум возникает при краевом давлении на вкладыш в любых условиях смазки [77]. Можно предположить, что при краевом давлении, движении и соударении нарушается целостность смазочной пленки, что приводит к сухому контакту, который в дальнейшем генерирует шум. Также скрип может свидетельствовать о нарушении жидкой пленки вследствие высокого коэффициента трения [71].

Другое экспериментальное исследование для выявления износа компонентов с помощью акустической эмиссии показало разницу звуков адгезивного и абразивного износа [78]. В случае керамической пары трения адгезивным износом можно считать сухое трение, а абразивным износом – наличие третьего тела. Оба эксперимента продемонстрировали, что при целостности пленки шум будет высокочастотным и одномоментным, а при сухом трении или при нарушении целостности поверхности частоты снижаются и увеличивается их продолжительность. Если обратиться к данным открытых источников, частота шума в основном колеблется в воспринимаемом человеком диапазоне [79, 80]. Анализ литературы для интерпретации видов шумов в керамической паре трения отразил вопросы, на которые ответы неоднозначны, поскольку нет единого консенсуса по классификации и названию шумов [25]. Лабораторных исследований по изучению пар трения на износостойкость и на продукцию шума имеется большой количественный и каждое из них вносит свой вклад в детальное изучение феномена шума [81]. Однако не все испытательные конструкции воссоздают условия функционирования человеческого сустава. Во-первых, трибологическая пара должна иметь хорошую смачиваемость для эффекта присасывания и иметь жидкость для смазки наподобие синовиальной жидкости. Во-вторых, мы должны понимать, что шум в основном воспроизводится при высоком давлении в паре трения эндопротеза и его можно получить лишь при статике нижней конечности и динамике таза. Из этого следует, что вертлужный компонент должен двигаться относительно оси головки бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава, а ни в коем случае иначе.

Клиническое ведение пациентов с шумом в тазобедренном суставе

Пациенты, которым планируется эндопротезирование тазобедренного сустава с использованием керамической пары трения, должны быть предупреждены

о возможных рисках появления шума в суставе и в будущем должны связаться с оперирующим врачом в случае появления шумов. Для предупреждения шума модель бедренного компонента должна быть тщательно подобрана в соответствии с особенностями позвоночно-тазовых взаимоотношений по принципу кинематического эндопротезирования [81]. Рекомендуется использовать навигацию при имплантации эндопротезов с керамической парой трения, так как применение навигации снижает риск раскола керамики в 2,7 раза и способствует оптимальной пространственной ориентации компонентов эндопротеза [22].

При обращении пациента с жалобами на шум в области оперированного сустава в первую очередь врач травматолог-ортопед должен исключить раскол керамических компонентов с помощью компьютерной томографии [6]. Известно, что большинство пациентов с расколом керамических компонентов не имеет в анамнезе травму, а события, приводящие к возникновению шума, весьма тривиальны [14, 48, 82, 83]. Шум при функционировании эндопротезов с керамической парой трения может стать предиктором риска разрушения [83]. Недавнее исследование продемонстрировало, что разрушение керамических компонентов происходит чаще из-за постоянных воздействий определенных сил, нежели в результате одномоментной травмы [12]. Lévéque R. и соавт. после наблюдения пациентов с перипротезными переломами с керамической парой трения в течение трех лет сообщили, что даже отсрочено не выявлено разрушения керамики после получения травмы бедренной кости [84]. КТ также служит для измерения положения и пространственной ориентации компонентов. Исключив раскол, специалист должен определить свойство шума – является ли он допустимым или неблагоприятным. Допустимый шум, как правило, является результатом нагрузки на задний край и возникает при глубоком сгибании тазобедренного сустава, таком как приседание, подъем со стула [64]. Такой тип шума обычно связан с каким-либо чрезмерным движением, избежать которого можно с помощью ортопедического режима и ограничения этих провоцирующих движений. Неблагоприятный же шум возникает при нормальном цикле движения, зачастую сопровождается болью и беспокоит пациента [64]. Считается, что данный тип шума связан с нагрузкой на передний край вкладыша. Walter W.L. и соавт. в своих исследованиях рекомендовали проводить ревизионную операцию при шумах, которые сопровождаются болью, или же при некорректной ориентации компонентов [6]. Если шум влияет на привычный образ жизни пациента и если имеются показания, то только по его согласию специалисту следует провести ревизионное оперативное вмешательство.

Дополнением к диагностике может стать исследование аспирата синовиальной жидкости [72]. Наличие в аспирате частиц 2-5 мкм может свидетельствовать о ранней стадии раскола керамических компонентов. Фрагменты, превышающие 5 мкм, свидетельствуют уже о макроскопических разрушениях в керамике [49]. Traina F. и соавт. на основе анализа синовиальной жидкости сообщили, что у пациентов, которые находятся

в группе слышимого шума в области протезированного сустава, в 81 % случаев шум был связан с расколом керамической пары трения. В группе пациентов с эндопротезированным тазобедренным суставом, но с бесшумным течением, только в 6,1 % случаев имелись признаки разрушения керамики, что заставляет с определенной осторожностью относиться к керамическим парам трения [85]. Тем более, неоднократно уже сообщалось о фактах обнаружения расколотого керамического компонента у пациентов, ранее имевших жалобы на шум [31]. Другие исследования солидарны с данной статистикой, а также отмечают, что в 100 % случаев шума керамическая пара трения имеет полосы износа [31, 35]. Inagaki K. и соавт. в своем исследовании описали 2-этапный проспективный скрининг пациентов с керамической парой трения, где количество пациентов с жалобами увеличивалось с каждым скринингом, при этом пациенты, имевшие жалобы на шум в предыдущих скринингах, имели их и в последующих, т.е. имелся эффект накопления пациентов с жалобами на шум [25]. Кроме того, один пациент с жалобами на скрип впоследствии был ревизован в связи с переломом керамического вкладыша. Kim M.W. и соавт. в проведенном многоэтапном контрольном наблюдении показали изменения частоты и высоты тона шумов у пациентов [86]. В связи с многогранностью шума в керамической паре трения не совсем ясно, является ли продукция шума причиной раскола керамики или же микроразрушения в керамической паре и есть причина шума в последующей полноценной сепарации компонента. Раскол керамических компонентов пары трения, в свою очередь, несмотря на статистическую незначимость, грозит неоднократными ревизиями. Так, анализ Австралийского регистра продемонстрировал, что частота второй ревизии после раскола керамических компонентов составляет 29,6 % за 3,5 года, что является неутешительным показателем [11].

В современной ортопедии керамическую пару рекомендуют имплантировать молодым и активным пациентам вследствие высокой выживаемости и отличных лабораторных результатов на износ [87]. Однако в связи с последними исследованиями следует сменить парадигму керамики. Устанавливая керамику молодому пациенту, мы обрекаем его на пожизненный выбор только керамической пары трения. При последующих ревизиях могут произойти ситуации, когда невозможно выбрать иную пару трения, кроме керамической. Молодым и активным пациентам лучше предпочесть пару трения «керамика-полиэтилен», а на последующей ревизии сделать выбор пары «керамика-керамика», хотя Fang Y. и соавт. в мета-анализе сравнительных рандомизированных контролируемых исследований пар трения «керамика-керамика» и «керамика-полиэтилен» продемонстрировали незначительную разницу износа пар трения и несущественную статистическую разницу осложнений [88]. Jack C.M. и соавт. сообщили о результатах выполненных ревизий, которые проводились в среднем через 8,3 года с заменой металлической или керамической головки с полиэтиленовым вкладышем на керамо-керамическую пару трения. Как итог, ни один пациент не сообщил о шуме в области установленного протеза [89].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе литературы, посвященной проблеме керамических пар трения, обнаружилось достаточно много нерешенных вопросов их функционирования в эндопротезах тазобедренного сустава, которые заставляют сдержанно относиться к выбору самой керамической пары, а в случае ее применения, принять меры для обеспечения оптимального функционирования пары путем идеальной имплантации компонентов протеза с применением роботизированных технологий и диспансеризации пациентов в последующем. Помимо этого, следует уточнить, что оценку шума в функционирующем эндопротезе на данный момент считают недостоверным и очень затратным методом, поскольку

размеры компонентов и их дизайн обуславливают разную частоту звука. К тому же факторы пациента значительно влияют на частоту звука, при этом сохраняется возможность оценивать амплитуду, длительность и характер звука [6, 73], что при накоплении базы данных приведет, возможно, к формированию иной гипотезы генеза шумов, методов их коррекции и прогнозирования раскола керамики. Керамическая пара трения не так хороша, как ее рекламируют, что, надо признать, является хорошей работой маркетологов, несмотря на то, что керамическая пара трения может сыграть роль «айсберга» для любого «Титаника».

Конфликт интересов: нет

Источник финансирования: нет

Этическая экспертиза: не требуется

Информированное согласие: не требуется

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rainer W, Shirley MB, Trousdale RT, Shaughnessy WJ. The Open Triradiate Cartilage: How Young Is Too Young for Total Hip Arthroplasty? *J Pediatr Orthop.* 2021;41(9):e793-e799. doi: 10.1097/BPO.0000000000001940
2. Шубняков И.И., Риахи А., Денисов А.О. и др. Основные тренды в эндопротезировании тазобедренного сустава на основании данных регистра артропластики НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена с 2007 по 2020 г. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(3):119-142. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-119-142
3. Holleyman RJ, Critchley RJ, Mason JM, et al. Ceramic Bearings Are Associated With a Significantly Reduced Revision Rate in Primary Hip Arthroplasty: An Analysis From the National Joint Registry for England, Wales, Northern Ireland, and the Isle of Man. *J Arthroplasty.* 2021;36(10):3498-3506. doi: 10.1016/j.arth.2021.05.027
4. Boutin P. Total arthroplasty of the hip by fritted aluminum prosthesis. Experimental study and 1st clinical applications. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* 1972;58(3):229-246.
5. Hannouche D, Nich C, Bizot P, et al. Fractures of ceramic bearings: history and present status. *Clin Orthop Relat Res.* 2003;(417):19-26. doi: 10.1097/01.blo.0000096806.78689.50
6. Walter WL, Waters TS, Gillies M, et al. Squeaking hips. *J Bone Joint Surg Am.* 2008;90 Suppl 4(Suppl 4):102-111. doi: 10.2106/JBJS.H.00867
7. Cai YZ, Yan SG. Development of ceramic-on-ceramic implants for total hip arthroplasty. *Orthop Surg.* 2010;2(3):175-181. doi: 10.1111/j.1757-7861.2010.00083.x
8. Jeffers JR, Walter WL. Ceramic-on-ceramic bearings in hip arthroplasty: state of the art and the future. *J Bone Joint Surg Br.* 2012;94(6):735-745. doi: 10.1302/0301-620X.94B6.28801
9. Xu J, Oni T, Shen D, et al. Long-Term Results of Alumina Ceramic-On-Ceramic Bearings in Cementless Total Hip Arthroplasty: A 20-Year Minimum Follow-Up. *J Arthroplasty.* 2022;37(3):549-553. doi: 10.1016/j.arth.2021.11.028
10. Lee GC, Kim RH. Incidence of Modern Alumina Ceramic and Alumina Matrix Composite Femoral Head Failures in Nearly 6 Million Hip Implants. *J Arthroplasty.* 2017;32(2):546-551. doi: 10.1016/j.arth.2016.08.011
11. Hoskins W, Rainbird S, Peng Y, et al. Incidence, Risk Factors, and Outcome of Ceramic-On-Ceramic Bearing Breakage in Total Hip Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2021;36(8):2992-2997. doi: 10.1016/j.arth.2021.03.021
12. Lucchini S, Baleani M, Giordina F, et al. A case-driven hypothesis for multi-stage crack growth mechanism in fourth-generation ceramic head fracture. *J Orthop Surg Res.* 2022;17(1):293. doi: 10.1186/s13018-022-03190-6
13. Kim SC, Lim YW, Jo WL, et al. Fourth-generation ceramic-on-ceramic THA results in improvements in midterm outcomes compared to third-generation THA but does not resolve noise problems: a cohort study of a single-hip system. *BMC Musculoskelet Disord.* 2019;20(1):263. doi: 10.1186/s12891-019-2641-x
14. Rambani R, Kepecs DM, Mäkinen TJ, et al. Revision Total Hip Arthroplasty for Fractured Ceramic Bearings: A Review of Best Practices for Revision Cases. *J Arthroplasty.* 2017;32(6):1959-1964. doi: 10.1016/j.arth.2016.12.050
15. Trebše R, Mihelič A, Levašič V, et al. Results of revision of total hip arthroplasty for alumina ceramic-on-ceramic bearing fracture. *Hip Int.* 2016;26(3):237-243. doi: 10.5301/hipint.5000340
16. Hamilton DF, Loth FL, Giesinger JM, et al. Validation of the English language Forgotten Joint Score-12 as an outcome measure for total hip and knee arthroplasty in a British population. *Bone Joint J.* 2017;99-B(2):218-224. doi: 10.1302/0301-620X.99B2.BJJ-2016-0606.R1
17. Jarrett CA, Ranawat AS, Bruzzone M, et al. The squeaking hip: a phenomenon of ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am.* 2009;91(6):1344-1349. doi: 10.2106/JBJS.F.00970
18. Tai SM, Munir S, Walter WL, et al. Squeaking in large diameter ceramic-on-ceramic bearings in total hip arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2015;30(2):282-285. doi: 10.1016/j.arth.2014.09.010
19. Owen DH, Russell NC, Smith PN, Walter WL. An estimation of the incidence of squeaking and revision surgery for squeaking in ceramic-on-ceramic total hip replacement: a meta-analysis and report from the Australian Orthopaedic Association National Joint Registry. *Bone Joint J.* 2014;96-B(2):181-187. doi: 10.1302/0301-620X.96B2.32784
20. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG; PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med.* 2009;6(7):e1000097. doi: 10.1371/journal.pmed.1000097
21. Slim K, Nini E, Forestier D, et al. Methodological index for non-randomized studies (minors): development and validation of a new instrument. *ANZ J Surg.* 2003;73(9):712-716. doi: 10.1046/j.1445-2197.2003.02748.x
22. Shah SM, Deep K, Siramanakul C, et al. Computer Navigation Helps Reduce the Incidence of Noise After Ceramic-on-Ceramic Total Hip Arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2017;32(9):2783-2787. doi: 10.1016/j.arth.2017.04.019
23. McDonnell SM, Boyce G, Baré J, et al. The incidence of noise generation arising from the large-diameter Delta Motion ceramic total hip bearing. *Bone Joint J.* 2013;95-B(2):160-165. doi: 10.1302/0301-620X.95B2.30450
24. Eichler D, Barry J, Lavigne M, et al. No radiological and biological sign of trunnionosis with Large Diameter Head Ceramic Bearing Total Hip Arthroplasty after 5 years. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2021;107(1):102543. doi: 10.1016/j.otsr.2019.12.015

25. Inagaki K, Iida S, Miyamoto S, et al. Natural history of noise and squeaking in cementless ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *J Orthop.* 2020;21:544-549. doi: 10.1016/j.jor.2020.09.009
26. Salo PP, Honkanen PB, Ivanova I, et al. High prevalence of noise following Delta ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *Bone Joint J.* 2017;99-B(1):44-50. doi: 10.1302/0301-620X.99B1.37612
27. Stanat SJ, Capozzi JD. Squeaking in third- and fourth-generation ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty: meta-analysis and systematic review. *J Arthroplasty.* 2012;27(3):445-453. doi: 10.1016/j.arth.2011.04.031
28. Zhao CC, Qu GX, Yan SG, Cai XZ. Squeaking in fourth-generation ceramic-on-ceramic total hip replacement and the relationship with prosthesis brands: meta-analysis and systematic review. *J Orthop Surg Res.* 2018;13(1):133. doi: 10.1186/s13018-018-0841-y
29. Sexton SA, Yeung E, Jackson MP, et al. The role of patient factors and implant position in squeaking of ceramic-on-ceramic total hip replacements. *J Bone Joint Surg Br.* 2011;93(4):439-442. doi: 10.1302/0301-620X.93B4.25707
30. Soriali E, Klouche S, Mamoudy P. Ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty: is squeaking related to an inaccurate three-dimensional hip anatomy reconstruction? *Orthop Traumatol Surg Res.* 2014;100(4):437-440. doi: 10.1016/j.otsr.2014.01.009
31. Castagnini F, Valente G, Crimi G, et al. Component positioning and ceramic damage in cementless ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *J Orthop Sci.* 2019;24(4):643-651. doi: 10.1016/j.jos.2018.12.011
32. Sarrazin J, Halbaut M, Martinot P, et al. Are CPR (Contact Patch to Rim) distance anomalies associated with the occurrence of abnormal noises from ceramic-on-ceramic THA? *Orthop Traumatol Surg Res.* 2023;109(1):103438. doi: 10.1016/j.otsr.2022.103438
33. Mai K, Verioti C, Ezzet KA, et al. Incidence of 'squeaking' after ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 2010;468(2):413-417. doi: 10.1007/s11999-009-1083-4
34. Keurentjes JC, Kuipers RM, Wever DJ, Schreurs BW. High incidence of squeaking in THAs with alumina ceramic-on-ceramic bearings. *Clin Orthop Relat Res.* 2008;466(6):1438-1443. doi: 10.1007/s11999-008-0177-8
35. Restrepo C, Parvizi J, Kurtz SM, et al. The noisy ceramic hip: is component malpositioning the cause? *J Arthroplasty.* 2008;23(5):643-649. doi: 10.1016/j.arth.2008.04.001
36. Choi IY, Kim YS, Hwang KT, Kim YH. Incidence and factors associated with squeaking in alumina-on-alumina THA. *Clin Orthop Relat Res.* 2010;468(12):3234-3239. doi: 10.1007/s11999-010-1394-5
37. Castagnini F, Cosentino M, Bracci G, et al. Ceramic-on-Ceramic Total Hip Arthroplasty with Large Diameter Heads: A Systematic Review. *Med Princ Pract.* 2021;30(1):29-36. doi: 10.1159/000508982
38. McAuley JP, Dennis DA, Grostefon J, Hamilton WG. Factors affecting modular acetabular ceramic liner insertion: a biomechanical analysis. *Clin Orthop Relat Res.* 2012;470(2):402-9. doi: 10.1007/s11999-011-2193-3
39. Lee SC, Jung KA, Nam CH, et al. Acetabular screw head-induced ceramic acetabular liner fracture in cementless ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *Orthopedics.* 2010;33(5). doi: 10.3928/01477447-20100529-30
40. Buttaro MA, Zanotti G, Comba FM, Piccaluga F. Primary Total Hip Arthroplasty With Fourth-Generation Ceramic-on-Ceramic: Analysis of Complications in 939 Consecutive Cases Followed for 2-10 Years. *J Arthroplasty.* 2017;32(2):480-486. doi: 10.1016/j.arth.2016.07.032
41. Yang JH, Yang SJ, Kang JS, Moon KH. Cementless Revision Total Hip Arthroplasty with Ceramic Articulation. *Hip Pelvis.* 2015;27(4):223-231. doi: 10.5371/hp.2015.27.4.223
42. Elkins JM, Pedersen DR, Callaghan JJ, Brown TD. Do obesity and/or stripe wear increase ceramic liner fracture risk? An XFEM analysis. *Clin Orthop Relat Res.* 2013;471(2):527-536. doi: 10.1007/s11999-012-2562-6
43. Poggie RA, Turgeon TR, Coutts RD. Failure analysis of a ceramic bearing acetabular component. *J Bone Joint Surg Am.* 2007;89(2):367-375. doi: 10.2106/JBJS.F.00148
44. Blakeney WG, Beaulieu Y, Puliero B, et al. Excellent results of large-diameter ceramic-on-ceramic bearings in total hip arthroplasty: Is Squeaking Related to Head Size. *Bone Joint J.* 2018;100-B(11):1434-1441. doi: 10.1302/0301-620X.100B11.BJJ-2018-0532.R1
45. Soriali E, Stewart T, Jin Z, Fisher J. Three-dimensional modeling of in vitro hip kinematics under micro-separation regime for ceramic on ceramic total hip prosthesis: an analysis of vibration and noise. *J Biomech.* 2010;43(2):326-33. doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.08.031
46. Swanson TV, Peterson DJ, Seethala R, et al. Influence of prosthetic design on squeaking after ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2010;25(6 Suppl):36-42. doi: 10.1016/j.arth.2010.04.032
47. Allain J, Roudot-Thoraval F, Delecun J, et al. Revision total hip arthroplasty performed after fracture of a ceramic femoral head. A multicenter survivorship study. *J Bone Joint Surg Am.* 2003;85(5):825-830. doi: 10.2106/00004623-200305000-00009
48. Таштанов Б.Р., Корыткин А.А., Павлов В.В., Шубняков И.И. Раскол керамического вкладыша эндопротеза тазобедренного сустава: клинический случай. *Травматология и ортопедия России.* 2022;28(3):63-73. doi: 10.17816/2311-2905-1804
49. Toni A, Traina F, Stea S, et al. Early diagnosis of ceramic liner fracture. Guidelines based on a twelve-year clinical experience. *J Bone Joint Surg Am.* 2006;88 Suppl 4:55-463. doi: 10.2106/JBJS.F.00587
50. De Fine M, Terrando S, Hintner M, et al. Pushing Ceramic-on-Ceramic in the most extreme wear conditions: A hip simulator study. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2021;107(1):102643. doi: 10.1016/j.otsr.2020.05.003
51. Al-Hajjar M, Fisher J, Tipper JL, et al. Wear of 36-mm BIOLOX(R) delta ceramic-on-ceramic bearing in total hip replacements under edge loading conditions. *Proc Inst Mech Eng H.* 2013;227(5):535-42. doi: 10.1177/0954411912474613
52. *Annual Report Australian Orthopaedic Association. National Joint Replacement Registry.* Adelaide, Australia: University of Adelaide; 2015. Available at: https://www.aoa.org.au/docs/default-source/annual-reports/annual-report-2014-2015_final-web.pdf?sfvrsn=4. Accessed Jul 25, 2023.
53. Blumenfeld TJ, Politi J, Coker S, et al. Long-Term Results of Delta Ceramic-on-Ceramic Total Hip Arthroplasty. *Arthroplast Today.* 2022;13:130-135. doi: 10.1016/j.artd.2021.11.006
54. Parvizi J, Adeli B, Wong JC, et al. A squeaky reputation: the problem may be design-dependent. *Clin Orthop Relat Res.* 2011;469(6):1598-605. doi: 10.1007/s11999-011-1777-2
55. Wu GL, Zhu W, Zhao Y, et al. Hip Squeaking after Ceramic-on-ceramic Total Hip Arthroplasty. *Chin Med J (Engl).* 2016;129(15):1861-1866. doi: 10.4103/0366-6999.186654
56. Restrepo C, Post ZD, Kai B, Hozack WJ. The effect of stem design on the prevalence of squeaking following ceramic-on-ceramic bearing total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am.* 2010;92(3):550-557. doi: 10.2106/JBJS.H.01326
57. Kim HS, Park JW, Lee SJ, et al. High Risk of Neck-liner Impingement and Notching Observed with Thick Femoral Neck Implants in Ceramic-on-ceramic THA. *Clin Orthop Relat Res.* 2022;480(4):690-699. doi: 10.1097/CORR.0000000000002022
58. Fan N, Morlock MM, Bishop NE, et al. The influence of stem design on critical squeaking friction with ceramic bearings. *J Orthop Res.* 2013;31(10):1627-32. doi: 10.1002/jor.22413
59. Lee TH, Moon YW, Lim SJ, Park YS. Meta-analysis of the Incidence and Risk Factors for Squeaking after Primary Ceramic-on-ceramic Total Hip Arthroplasty in Asian Patients. *Hip Pelvis.* 2014;26(2):92-8. doi: 10.5371/hp.2014.26.2.92
60. Kontopoulos DG, García-Carreras B, Sal S, et al. Use and misuse of temperature normalisation in meta-analyses of thermal responses of biological traits. *PeerJ.* 2018;6:e4363. doi: 10.7717/peerj.4363
61. Hua ZK, Yan XY, Liu DX, et al. Analysis of the friction-induced squeaking of ceramic-on-ceramic hip prostheses using a pelvic bone finite element model. *Tribol Lett.* 2016;61:1-7. doi: 10.1007/s11249-016-0644-4
62. Restrepo C, Matar WY, Parvizi J, et al. Natural history of squeaking after total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 2010;468(9):2340-2345. doi: 10.1007/s11999-009-1223-x
63. Walter WL, Kurtz SM, Esposito C, et al. Retrieval analysis of squeaking alumina ceramic-on-ceramic bearings. *J Bone Joint Surg Br.* 2011;93(12):1597-1601. doi: 10.1302/0301-620X.93B12.27529
64. Walter WL, Insley GM, Walter WK, Tuke MA. Edge loading in third generation alumina ceramic-on-ceramic bearings: stripe wear. *J Arthroplasty.* 2004;19(4):402-413. doi: 10.1016/j.arth.2003.09.018

65. Al-Hajjar M, Fisher J, Williams S, et al. Effect of femoral head size on the wear of metal on metal bearings in total hip replacements under adverse edge-loading conditions. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2013;101(2):213-222. doi: 10.1002/jbm.b.32824
66. Park YS, Hwang SK, Choy WS, et al. Ceramic failure after total hip arthroplasty with an alumina-on-alumina bearing. *J Bone Joint Surg Am*. 2006;88(4):780-787. doi: 10.2106/JBJS.E.00618
67. Pierrepont JW, Feyen H, Miles BP, et al. Functional orientation of the acetabular component in ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty and its relevance to squeaking. *Bone Joint J*. 2016;98-B(7):910-916. doi: 10.1302/0301-620X.98B7.37062
68. Pierrepont J, Yang L, Arulampalam J, et al. The effect of seated pelvic tilt on posterior edge-loading in total hip arthroplasty: A finite element investigation. *Proc Inst Mech Eng H*. 2018;232(3):241-248. doi: 10.1177/0954411917752028
69. Chevillotte C, Trousdale RT, An KN, et al. Retrieval analysis of squeaking ceramic implants: are there related specific features? *Orthop Traumatol Surg Res*. 2012;98(3):281-287. doi: 10.1016/j.otsr.2011.12.003
70. Bishop NE, Hothan A, Morlock MM. High friction moments in large hard-on-hard hip replacement bearings in conditions of poor lubrication. *J Orthop Res*. 2013;31(5):807-813. doi: 10.1002/jor.22255
71. Pinzi M, Galvan S, Rodriguez Y Baena F. The Adaptive Hermite Fractal Tree (AHFT): a novel surgical 3D path planning approach with curvature and heading constraints. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2019;14(4):659-670. doi: 10.1007/s11548-019-01923-3
72. Stea S, Traina F, Beraudi A, et al. Synovial fluid microanalysis allows early diagnosis of ceramic hip prosthesis damage. *J Orthop Res*. 2012;30(8):1312-20. doi: 10.1002/jor.22077
73. Glaser D, Komistek RD, Cates HE, Mahfouz MR. Clicking and squeaking: in vivo correlation of sound and separation for different bearing surfaces. *J Bone Joint Surg Am*. 2008;90(Suppl 4):112-120. doi: 10.2106/JBJS.H.00627
74. Imbuldeniya AM, Pearce SJ, Walter WL, et al. Squeaking: Current knowledge and how to avoid it. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2013;6(4):342-349. doi: 10.1007/s12178-013-9181-z
75. Schroder D, Bornstein L, Bostrom MP, et al. Ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty: incidence of instability and noise. *Clin Orthop Relat Res*. 2011;469(2):437-42. doi: 10.1007/s11999-010-1574-3
76. Traina F, Tassinari E, De Fine M, et al. Revision of ceramic hip replacements for fracture of a ceramic component: AAOS exhibit selection. *J Bone Joint Surg Am*. 2011;93(24):e147. doi: 10.2106/JBJS.K.00589
77. O'Dwyer Lancaster-Jones O, Reddiough R. The occurrence of squeaking under wear testing standards for ceramic on ceramic total hip replacements. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2023;138:105616. doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105616
78. Olorunlambe KA, Hua Z, Shepherd DET, Dearn KD. Towards a Diagnostic Tool for Diagnosing Joint Pathologies: Supervised Learning of Acoustic Emission Signals. *Sensors (Basel)*. 2021;21(23):8091. doi: 10.3390/s21238091
79. Hothan A, Huber G, Weiss C, et al. The influence of component design, bearing clearance and axial load on the squeaking characteristics of ceramic hip articulations. *J Biomech*. 2011;44(5):837-841. doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.12.012
80. Weiss C, Gdaniec P, Hoffmann NP, et al. Squeak in hip endoprosthesis systems: An experimental study and a numerical technique to analyze design variants. *Med Eng Phys*. 2010;32(6):604-609. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.02.006
81. Piriou P, Ouenzerfi G, Migaud H, et al. A numerical model to reproduce squeaking of ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty. Influence of design and material. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2016;102(4 Suppl):S229-S234. doi: 10.1016/j.otsr.2016.03.005
82. Shafafy R, Foote J, Hargrove R. A novel technique for identification of fractured ceramic acetabular liner in total hip arthroplasty: a case report. *Hip Int*. 2015;25(5):492-494. doi: 10.5301/hipint.5000236
83. Abdel MP, Heyse TJ, Elpers ME, et al. Ceramic liner fractures presenting as squeaking after primary total hip arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am*. 2014;96(1):27-31. doi: 10.2106/JBJS.M.00737
84. Lévêque R, Sedel L, Nizard R, et al. Risk of simultaneous and delayed breakage of total hip replacement ceramic implants in patients with trauma induced periprosthetic fracture and acetabular shell loosening. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2023;109(4):103534. doi: 10.1016/j.otsr.2022.103534
85. Traina F, De Fine M, Bordini B, Toni A. Risk factors for ceramic liner fracture after total hip arthroplasty. *Hip Int*. 2012;22(6):607-14. doi: 10.5301/HIP.2012.10339
86. Kim MW, Kim SM, Chung YY. Total Hip Arthroplasty Using Ceramic-on-ceramic Bearing Surfaces: Long-term Assessment of Squeaking Sounds. *Hip Pelvis*. 2018;30(1):18-22. doi: 10.5371/hp.2018.30.1.18
87. Atrey A, Wolfstadt JI, Hussain N, et al. The Ideal Total Hip Replacement Bearing Surface in the Young Patient: A Prospective Randomized Trial Comparing Alumina Ceramic-On-Ceramic With Ceramic-On-Conventional Polyethylene: 15-Year Follow-Up. *J Arthroplasty*. 2018;33(6):1752-1756. doi: 10.1016/j.arth.2017.11.066
88. Shang X, Fang Y. Comparison of Ceramic-on-Ceramic vs. Ceramic-on-Polyethylene for Primary Total Hip Arthroplasty: A Meta-Analysis of 15 Randomized Trials. *Front Surg*. 2021;8:751121. doi: 10.3389/fsurg.2021.751121
89. Jack CM, Molloy DO, Walter WL, et al. The use of ceramic-on-ceramic bearings in isolated revision of the acetabular component. *Bone Joint J*. 2013;95-B(3):333-338. doi: 10.1302/0301-620X.95B3.30084

Статья поступила в редакцию 19.06.2023; одобрена после рецензирования 11.07.2023; принята к публикации 25.08.2023.

The article was submitted 19.06.2023; approved after reviewing 11.07.2023; accepted for publication 25.08.2023.

Информация об авторах:

1. Байкожо Рустамович Таштанов – ординатор, b.tashtanov95@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8553-9712>;
2. Ирина Анатольевна Кирилова – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе, доцент, irinakirilova71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1911-9741>;
3. Дарья Витальевна Павлова – dariiys@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0051-2481>;
4. Виталий Викторович Павлов – доктор медицинских наук, начальник отделения, профессор, pavlovdoc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8997-7330>.

Information about authors:

1. Baikozho R. Tashtanov – resident, b.tashtanov95@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8553-9712>;
2. Irina A. Kirilova – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director for Research, Associate Professor, irinakirilova71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1911-9741>;
3. Daria V. Pavlova – dariiys@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0051-2481>;
4. Vitaly V. Pavlov – Doctor of Medical Sciences, Head of Department, Professor, pavlovdoc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8997-7330>.

Вклад авторов:

1. Таштанов Б.Р. – концептуализация, формальный анализ, обработка данных, написание – первоначальный вариант, визуализация.
2. Кирилова И.А. – контроль, написание – рецензирование и редактирование.
3. Павлова Д.В. – формальный анализ, обработка данных, написание – рецензирование и редактирование.
4. Павлов В.В. – концептуализация, методология, валидация, визуализация, управление проектом.