

Труды МАИ. 2023. № 129
Trudy MAI, 2023, no. 129

Обзорная статья
УДК 621.787:539.319
DOI: [10.34759/trd-2023-129-03](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-03)

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Андрей Викторович Письмаров

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени академика С.П. Королёва,
Королёв, Россия

andrei_pismarov@mail.ru

Аннотация. Проведен обзор литературы с целью изучения и состояния проблемы прогнозирования предела выносливости резьбовых деталей. Рассмотрены гладкие детали и детали с концентраторами напряжений. Установлены основные причины разрушения резьбовых деталей. Изучено влияние упрочнения поверхности резьбовых деталей методами поверхностного пластического деформирования. Установлено, что упрочнение поверхности приводит к появлению в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, которые увеличивают предел выносливости резьбовых деталей. Рассматриваются методы прогнозирования предела выносливости резьбовых деталей, дается оценка их точности и достоверности. Отдельным блоком рассматриваются вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния нагруженной резьбовой детали с целью определения предела выносливости численными методами. На основе обзора делается вывод о необходимости

разработки метода прогнозирования предела выносливости упрочненных резьбовых деталей с учетом технологии изготовления, усилий затяжки, условий эксплуатации и других факторов.

Ключевые слова: резьбовые детали, концентрация напряжений, остаточные напряжения, поверхностное упрочнение, моделирование напряженно-деформированного состояния, прогнозирование предела выносливости

Для цитирования: Письмаров А.В. К вопросу прогнозирования предела выносливости резьбовых деталей с поверхностным упрочнением // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-03](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-03)

Original article

TO THE QUESTION OF PREDICTION OF THE ENDURANCE LIMIT OF THREADED PARTS WITH SURFACE HARDENING

Andrey V. Pismarov

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,

Korolev, Russia

andrei_pismarov@mail.ru

Abstract. A review of the literature was carried out in order to study the state of the problem of predicting the endurance limit of threaded parts. Smooth parts and parts with stress concentrators are considered. An analysis of the destruction of threaded parts (bolts, studs, etc.) experiencing alternating loads during operation shows that, in general, the destruction of threaded parts is of a fatigue nature. The influence of surface hardening of threaded parts by methods of surface plastic deformation has been studied: to increase the service life, that

is, to increase the life cycle during the operation of threaded parts at the stage of their manufacture, surface hardening methods are widely used. The maximum effect of their application is achieved under conditions of stress concentration. This is justified, since the destruction occurs in places where the prismatic geometry is violated. It has been established that surface hardening leads to the appearance of compressive residual stresses in the surface layer, which increase the endurance limit of threaded parts. Methods for predicting the endurance limit of threaded parts are considered, their accuracy and reliability are assessed. A separate block considers the issues of modeling the stress-strain state of a loaded threaded part in order to determine the endurance limit by numerical methods. At the stage of machine design, it is important to be able to evaluate the effect of the applied methods of surface plastic deformation. Based on the review, it is concluded that it is necessary to develop a method for predicting the fatigue limit of hardened threaded parts, taking into account manufacturing technology, tightening forces, operating conditions and other factors.

Keywords: threaded parts, stress concentration, residual stresses, surface hardening, stress-strain state modeling, fatigue limit prediction

For citation: Pismarov A.V. To the question of prediction of the endurance limit of threaded parts with surface hardening. Trudy MAI, 2023, no.129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-03)

[03](#)

Главной тенденцией развития отечественной космонавтики является создание российской орбитальной станции (РОС). Для долгосрочного использования станции необходимо повышать эксплуатационные характеристики деталей и узлов путём

оптимизации конструктивных параметров. Одним из ответственных мест станции является место крепления штанги солнечной батареи к негерметичному отсеку. В процессе корректировки орбиты, пристыковки и отстыковки космических кораблей на болтах крепления штанги солнечной батареи возникают знакопеременные нагрузки, что при долгосрочном использовании станции может привести к поломке крепёжных элементов.

Резьбовые детали (шпильки, болты, винты) находят все более широкое применение в качестве крепежных элементов при проектировании различного рода узлов машин и механизмов. Стремление обеспечить высокую надежность такого рода деталей привело к тому, что резьбовые детали все чаще изготавливаются из высокопрочных сталей и титановых сплавов. Применение современных высокопрочных материалов приводит к улучшению весогабаритных характеристик машин, но не приводит к существенному повышению сопротивления усталости.

В настоящем обзоре рассматриваются труды, посвящённые причинам возникновения трещин, а также дефектам, приводящим к разрушению резьбовых деталей, определению и моделированию остаточных напряжений в резьбовых деталях, их влиянию на многоцикловое сопротивление усталости, методам прогнозирования предела выносливости упрочнённых резьбовых деталей.

На работоспособность резьбовых деталей основное влияние оказывают конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы.

Конструктивные решения, например, изменение профиля резьбы, увеличение радиуса скругления впадин резьбы, увеличение длины свинчивания, совершенствование форм болта и гайки, форма перехода от резьбовой к гладкой части

болта, приводят к увеличению предельной амплитуды цикла напряжений на 25-40%, но это увеличение связано, в основном, улучшением распределения нагрузки между витками резьбы [1].

Срок безаварийной эксплуатации механизмов и машин определяется надежностью и ресурсом резьбовых деталей. Основными причинами их разрушения являются наличие концентраторов напряжений, переменные во времени напряжения, характеризующиеся амплитудой цикла, а также средними напряжениями цикла, соответствующими усилию затяжки. Отмеченные факторы могут вызвать движение линейных дефектов кристаллической структуры металла, что в свою очередь приведёт к появлению микро- а затем и макротрещин, и, в итоге, к разрушению [2].

Для обеспечения необходимой прочности резьбовых деталей при знакопеременных нагрузках необходимо стремиться к повышению качества поверхностного слоя, которое характеризуется шероховатостью, макро- и микроструктурой, степенью наклепа, уровнем и характером распределения остаточных напряжений.

Процесс формообразования резьбы также приводит к исчерпанию запаса пластичности металла в поверхностном слое и возникновению несплошностей в виде трещин.

Так в работе [3] исследовали причины разрушения болтового соединения. Во всех исследованных болтах трещина развивалась по радиусу R перехода головки в тело (стержень) болта. Определение траектории распространения усталостной трещины в любой части болта изучалось методом мезотопографии поверхности разрушения. Было установлено, что разрушение болтов носит многоочаговый

усталостный характер. Рост длины трещины в центральном сечении болта не совпадает с макроориентацией излома и сопровождается появлением радиальных мезолиний нестационарного (блочного) нагружения. Очаги зарождения трещины располагаются по полуокружности с одной стороны относительно оси симметрии болтов. Разрушению болтов и появлению усталостных трещин способствовала высокая концентрация напряжений и действие коррозионно-активной среды.

Растягивающие усилия являются основным, наиболее часто встречающимся видом нагружения резьбовых деталей и бывают вызваны, как правило, двумя составляющими: предварительной затяжкой соединения и нагрузкой, возникающей на фланцах при работе сопрягаемых деталей [4].

В работе [5] проводили исследования деталей из стали 30ХГСА. Анализу подвергались вильчатые болты. Характер излома показал, что разрушение носит усталостный характер. Оказалось, что очаги разрушения расположены у начала галтельного перехода от стержня болта к полке, где наблюдались значительные потертости, способствовавшие многоочаговому образованию трещин. В качестве предложений по увеличению срока службы болтов даны рекомендации по снижению шероховатости поверхности болтов, исключению возможности перекоса, а также проведения анализа технологии изготовления болтов, в том числе условий проведения термической обработки.

Приведенные выше, а также многие другие работы подтверждают тот факт, что основными причинами разрушения резьбовых деталей, как было сказано ранее, является усталостное разрушение в условиях концентрации напряжений.

Для повышения сопротивления усталости резьбовых деталей используют различные методы упрочнения, которые создают в тонком поверхностном слое деталей сжимающие остаточные напряжения.

Остаточные напряжения – это напряжения, которые существуют и уравниваются внутри твёрдого тела независимо от внешних воздействий. Они возникают при неоднородном деформированном состоянии, которое вызывается неоднородной пластической деформацией, фазовыми и структурными превращениями, тепловым расширением и т. д.

С точки зрения практики наибольшую значимость имеют остаточные напряжения после механической, термической и отделочно-упрочняющих обработок, а также релаксация (уменьшение) остаточных напряжений под воздействием повышенных рабочих температур.

В большей части работ рассматриваются остаточные напряжения в гладких деталях [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Эти работы неоднократно анализировались в диссертациях и обзорных статьях [12, 13, 14, 15, 16, 17]. А между тем наиболее интересными, с точки зрения практики, являются остаточные напряжения в местах «резкого нарушения призматической формы деталей, т.к. именно здесь зарождаются усталостные трещины, приводящие к разрушению» [18].

Исследованию остаточных напряжений и их влиянию на сопротивление усталости деталей машин посвящена обширная литература. Чаще всего исследователи рассматривают макронапряжения, для определения которых применяют, как правило, механический метод, основанный на удалении слоев

материала детали и измерения возникающих при этом перемещений или деформаций [9, 11, 15, 19, 20].

Исследования остаточных напряжений в резьбовых деталях.

В работе [21] предпринята попытка оценки остаточных напряжений в шпильках М36Х3. При этом использовался метод канавок, которые наносили на торцевые поверхности дисков, вырезанных из шпилек. Таким образом, определялись окружные остаточные напряжения в шпильке, но не во впадине, осевые остаточные напряжения не определялись. Несмотря на некоторые недостатки данного метода исследования, была получена качественная картина распределения остаточных напряжений, которая показала, что в накатанной резьбе остаточные напряжения имеют более благоприятный характер, чем в шлифованной.

Остаточные напряжения в резьбовых деталях определялись в работе [22]. Исследовались кольца и полоски, вырезанные из детали. Дополнительные остаточные напряжения, возникающие при вырезке, не учитывались. Слои материала удалялись со всей поверхности детали, что приводило к значительному усреднению результатов. В качестве расчетной схемы использовались упруго-гладкие образцы, а возникающие при этом ошибки не оценивались.

Осевые остаточные напряжения в резьбе болтов М10 из высокопрочных сталей определялись в работе [23]. Для расчета остаточных напряжений измерялись продольные деформации резьбовой части болта при удалении материала шлифованием слоями 50 мкм. Расчетные соотношения значительно упрощены, а

деформации весьма малы (2 мкм на длине 26 мм), что существенно сказывается на точности метода.

В работе [24] предложен метод определения осевых и окружных остаточных напряжений во впадинах резьбы, заключающийся в расчете остаточных напряжений по результатам исследований колец и полосок, вырезанных из деталей с внутренней или наружной резьбой. При этом были учтены остаточные напряжения, связанные с вырезкой колец и полосок, слои материала удалялись с криволинейной части впадин резьбы. Для деталей с малой жесткостью и большим числом витков предложен метод определения остаточных напряжений, основанный на измерении деформаций самой детали, вызываемых освобождением остаточных напряжений при удалении неполных резьбовых канавок по впадинам резьбовой детали. Точность обоих методов мала из-за недостаточно обоснованных допущений при выводе расчетных соотношений с использованием элементарной теории изгиба. Оценка влияния технологии изготовления на остаточные напряжения не проводилась.

Результаты исследования остаточных напряжений [17, 25] показали, что влияние способа и режимов изготовления болтов на сопротивление усталости связано с различным уровнем остаточных напряжений в резьбе.

Более простой метод определения меридиональных остаточных напряжений во впадинах резьбы изложен в статье [26]. Он заключается в удалении слоев материала в пределах половины поверхности криволинейной части дна впадины резьбы и измерении возникающих при этом деформаций. Задача о связи перемещений и остаточных напряжений решена методом конечного элементного моделирования. Учет измерения геометрии профиля в процессе удаления слоев для резьб М10-М16

проводился приближенно с помощью плоской задачи теории упругости, что существенно сказывается на точности измерения напряжений в резьбовых деталях малых размеров. Определены остаточные напряжения в резьбе накатанных болтов М10-М16.

Исследование авторов [27] посвящено изложению методики экспериментального определения осевых и тангенциальных (окружных) остаточных напряжений в поверхностном слое впадин крупной резьбы с учетом плоского напряженного состояния. По данной методике построены эпюры распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя впадин наружной резьбы М64х6 с учетом плоского напряженного состояния. Из резьбовой детали вырезали продольные и кольцевые образцы с размерами поперечных сечений, обеспечивающими их линейное напряженное состояние. В специальной установке поверхностный слой впадин резьбы удаляли электрохимическим травлением с измерением остаточных деформаций образца. Получены зависимости для расчета осевых и тангенциальных напряжений по деформациям образцов от вырезки и удаления поверхностного слоя. Осевые остаточные напряжения в поверхностном слое определялись с использованием формул сопротивления материалов, как усреднённая величина. К сожалению, в работе не указана точность, с которой проводилось снятие деформаций образца с использованием рычага-усилителя.

В работе [28] экспериментально оценивали остаточные напряжения во впадинах и на боковых поверхностях резьбы неразрушающим методом с помощью рентгеновского дифрактометра XStress3000G3R. Контроль производился на глубине до 0,15–0,20 мм поверхностного слоя при предварительных исследованиях.

Измерения остаточных напряжений проводились рентгеновским методом в 4-х точках вдоль одного витка резьбы. Однако рентгеновский метод, который рассматривается в работе [29] показывает невысокую точность распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя. В работе рассматривали также метод АФЧХ-тестирования. Авторы приходят к выводу, что при использовании метода АФЧХ-тестирования можно определить лишь величину средних напряжений по глубине упрочненного слоя.

В статье [30] определяли основные параметры калибровки заготовок, влияющие на формирование остаточных напряжений. Главные компоненты тензора остаточных напряжений в калиброванных прутках определены по методу обтачивания и растачивания одного цилиндра. Для выявления влияния основных параметров процесса калибровки на остаточное напряженное состояние использована методика планирования многофакторных экспериментов. Для учета одновременного влияния на остаточные напряжения величины относительного обжатия, угла рабочего конуса волоки, скорости калибровки, качества смазки был спланирован и реализован подробный четырехфакторный эксперимент. Из проведенных опытов выявлено, что параметры процесса калибровки существенно влияют на остаточные напряжения, которые изменяются не только по величине, но и по знаку. Установлено влияние основных параметров процесса калибровки на величину и характер распределения по сечению цилиндрических прутков осевых, тангенциальных и радиальных остаточных напряжений.

Моделирование остаточных напряжений

Моделированию остаточных напряжений в деталях с использованием расчетных программ посвящены исследования многих авторов [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40], изложенные в статьях, монографиях и диссертациях.

В работе [41] использовался метод термоупругости для определения первоначальных деформаций на конечно-элементных моделях образцов-свидетелей путём последовательных итераций до совпадения расчётной и экспериментальной эпюр остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое.

В статье [42] рассмотрена «возможность использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для оценки циклической долговечности резьбовых деталей в области малоциклового усталости». Рассмотрены технологические факторы, влияющие на возникновение и распределение остаточных напряжений. Однако в статье не сказано, как и каким методом производилось моделирование остаточных напряжений при расчете количества циклов до разрушения.

Расчету и моделированию остаточных напряжений посвящена работа [43]. Представлены результаты аналитического расчета остаточных напряжений в рельсе Р65 при деформациях изгибом в двух плоскостях и кручением. При тех же видах деформирования проведен расчет и моделирование остаточных напряжений с использованием программы ANSYS Mechanical. Отмечена значительно большая трудоемкость аналитического расчета и нецелесообразность его использования при наличии компьютерных программ. Авторы вводят коэффициент упрочнения Π , но не

говорят, как и каким образом он был получен. Кроме этого, нет описания метода моделирования остаточных напряжений в программе ANSYS Mechanical.

Аналогичное решение моделирования остаточных напряжений представлено в работе [44]. Принцип моделирования остаточных напряжений основан на неоднородной пластической деформации. В деформированных профилях изменяли механические свойства материала введением поправочных коэффициентов на эффект Баушингера и задавался режим повторного нагружения с последующим определением остаточных напряжений.

В работе [45] проанализированы существующие математические модели остаточных напряжений, возникающих в полom толстостенном цилиндре с концентратором напряжений в виде полукруглого надреза, откорректированы математические модели остаточных напряжений, учитывающие повторные нагружения. На базе широкого теоретического исследования математической модели найдены оптимальные параметры расчёта суммарных остаточных напряжений, которые дают возможность сократить время расчётов. В работе отсутствует экспериментальная составляющая, которая подтвердила бы характер и порядок остаточных напряжений в поверхностном слое.

В диссертации [46] разработана система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей, представляющая собой совокупность программных комплексов, связанных соответствием форматов входных и выходных данных. Система позволяет рассчитывать термические остаточные напряжения заготовок, используемых для производства маложестких деталей, с погрешностью не более 5%.

В статье [47] рассматривается проблема решения связанных задач механики применительно к моделированию остаточных напряжений при нестационарных тепловых воздействиях. Рассмотрены особенности и методы решения связанной термосиловой контактной задачи с учетом фазовых превращений, протекающих при высокоскоростном охлаждении. Показаны основные этапы построения необходимых определяющих соотношений. Приведены соответствующие соотношения теории пластического течения в скоростной форме в рамках изотропно-трансляционной модели упрочнения, рассмотрены вопросы интегрирования данных соотношений. Показана методика определения нестационарной зоны контакта абсолютно жесткого штампа и деформируемого полупространства. Отдельно рассмотрены основные этапы линеаризации используемого вариационного уравнения. Показана значительная роль деформационной составляющей воздействия на материал при формировании остаточных напряжений. В работе представлены результаты расчета в программном комплексе ANSYS, но не показано как задавали граничные условия, а также каким образом моделировались остаточные напряжения.

В диссертации [48] рассматривается методика моделирования остаточных напряжений при цементации. «При расчете остаточных напряжений в программу закладывались конкретные свойства материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, распределение концентрации углерода по глубине, коэффициент увеличения объема цементованного слоя при ТО). Для задания упрочненного слоя использовалась линейная характеристика расширения мартенсита, пересчитанная в усредненный коэффициент линейного расширения, имеющий ту же закономерность изменения по толщине образца, что и концентрация углерода. Каждому слою с

заданным диапазоном концентрации углерода назначается коэффициент линейного расширения, соответствующий средней концентрации углерода в слое. В дальнейшем для моделирования объемных изменений в пластине, последней задается эквивалентная температура, которая вызывает деформацию равную деформации экспериментального образца» [48].

В статье [49] рассматриваются остаточные напряжения в сварных швах. Для моделирования остаточного напряжения были использованы элементы SOLID70 и SOLID90. Элементы (SOLID70) использовались в областях, удаленных от температурных градиентов, а более мелкая сетка из элементов (SOLID 90) использовалась в области с высокими температурными градиентами. Остаточные напряжения задавались температурным полем.

Аналогичный метод задания остаточных напряжений был реализован в работе [50]. Для конечно-элементной модели принималась плоская деформация. Температурное поле накладывалось равномерно по длине сварного шва.

В работе [51] остаточные напряжения задавались с использованием искусственного 2,5D элемента. Было сделано предположение, что несоответствие коэффициентов теплового расширения является единственным механизмом, вызывающим остаточное напряженное состояние. Чтобы получить собственное деформированное состояние, на которое не накладываются искусственные деформации, к элементарной ячейке применялись граничные условия свободного расширения, чтобы обеспечить периодические или линейные граничные условия перемещения.

В статье [34] рассматриваются остаточные напряжения в рельсах. Было установлено, что усталостные трещины появляются из-за высоких кольцевых напряжений. В работе была использована трехмерная упругопластическая конечная модель. Остаточные напряжения в рельсе задавались температурным полем с учётом изменения их по времени.

Работа [52] посвящена моделированию остаточных напряжений при электронно-лучевом плавнении. Остаточные напряжения задавались в модели послойно, каждому слою задавалось определенное температурное поле. Затем между слоями реализовывался контакт.

Прогнозирование предельной амплитуды

В монографии [1] предложен метод определения предельной амплитуды цикла для детали с остаточными напряжениями по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений

$$\sigma_{Ra} = \sigma_{Ra}^0 - \bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)} \bar{\sigma}_{ocm}, \quad (1)$$

где σ_{Ra} — предельная амплитуда цикла для детали с остаточными напряжениями;

σ_{Ra}^0 — предельная амплитуда цикла для детали без остаточных напряжений;

$\bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)}$ — коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду

цикла при среднем напряжении σ_m ;

$\bar{\sigma}_{ocm}$ — критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Коэффициент $\bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)}$ при $\sigma_m > \sigma_m^T$ вычисляется по формуле

$$\bar{\Psi}_{\sigma}^{-(m)} = \bar{\Psi}_{\sigma} - \frac{\sigma_{-1p}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k |\bar{\sigma}_{ост}|} \quad (2)$$

Из (1) следует выражение для определения приращения предельной амплитуды цикла:

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\Psi}_{\sigma}^{(m)} |\bar{\sigma}_{ост}|. \quad (3)$$

В свою очередь критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ определяется по формуле [1]:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (4)$$

где $\sigma_z(\xi)$ — осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором;

$\xi = \frac{y}{t_{кр}}$ — расстояние от дна надреза до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$;

$t_{кр}$ — критическая глубина нераспространяющейся усталостной трещины,

возникающей при работе деталей на пределе выносливости.

Использование зависимостей (1) и (4) для определения предела выносливости деталей с остаточными напряжениями показало хорошее совпадение с экспериментальными данными [1].

В работе [1] показано, что для вычисления величины $\bar{\Psi}_{\sigma}$ можно использовать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{\sigma} &= 0,612 - 0,081\alpha_{\sigma}; \\ \bar{\Psi}_{\sigma} &= 0,514 - 0,065K_{\sigma}. \end{aligned} \quad (4)$$

Однако использование данного метода затруднительно, поскольку необходимо каждый раз определять эпюру остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя, проводить испытания на усталость, а затем вычислять величину $\bar{\psi}_\sigma$.

В результате проведенного литературного обзора установлено следующее:

- имеется значительное количество работ, посвященных определению и распределению по глубине поверхностного слоя остаточных напряжений в резьбовых деталях;
- представленные результаты моделирования остаточных напряжений относятся к гладким образцам;
- существующие методики прогнозирования предела выносливости резьбовых деталей имеют ряд недостатков: необходимо проведение испытаний на усталость для определения приращения предельной амплитуды и вычисления величины $\bar{\psi}_\sigma$;
- до настоящего времени не разработано достоверных методов, позволяющих минуя экспериментальное проведение испытаний на усталость, осуществлять оценку предельной амплитуды упрочненных резьбовых деталей при наличии механических характеристик материала, распределения остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы и средних напряжений, вызванных усилием затяжки.

Заключение

Совершенствование расчетных методов определения прочностных характеристик деталей выдвигает на первый план насущную необходимость разработки методики оценки прогнозирования предела выносливости резьбовых деталей, позволяющих минуя экспериментальное проведение испытаний на

усталость, осуществлять оценку предельной амплитуды упрочненных резьбовых деталей при наличии механических характеристик материала, распределения остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы и средних напряжений, вызванных усилием затяжки.

Список источников

1. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей: монография. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – 170 с.
2. Потехин Р.Н. Основные причины разрушения резьбовых соединений // Международная научная конференция "Решетневские чтения" (Красноярск, 12-15 ноября 2013): сборник трудов. – Красноярск: СибГАУ, 2013. С. 433-434.
3. Васильев В.Ю., Галаган Г.Е., Семин А.Е., Шапкин В.С. Исследование разрушения стыковочных болтов // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 50-56.
4. Полоник Е.Н., Суренский Е.А., Федотов А.А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности механических соединений элементов авиаконструкций // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76755>
5. Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Виноградов С.С. Особенности разрушения деталей крепежа из конструкционной стали // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). С. 66-74.
6. Абрамов В.В. Уточнение механических методов определения остаточных напряжений. – Пермь: Дом НТО, 1984. С. 70-74.
7. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 184 с.

8. Бабей Ю.И., Бережницкая М.Ф. Методы определения остаточных напряжений первого рода. – Львов: ФМИ АН УССР, 1980. - 64 с.
9. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
10. Гликман Л.А. Методы определения остаточных напряжений // Труды Ленинградского инженерно-экономического института. 1960. № 30. С. 58-98.
11. Промптов А.И. Технологические остаточные напряжения. – Иркутск: ИПИ, 1980. – 220 с.
12. Букатый С.А. Исследование деформаций деталей, возникающих после обработки поверхности. Дисс.....канд. техн. наук. – Куйбышев: КПТИ, 1979. - 167 с.
13. Вакулюк В.С. Определение остаточных напряжений в шлицевых деталях. Автореферат дисс.....канд. техн. наук. – М.: 1983. - 15 с.
14. Григорьева И.В. Определение остаточных напряжений в цилиндрических деталях. Автореферат дисс.....канд. техн. наук. – Куйбышев: КПТИ, 1978. – 23 с.
15. Иванов С.И. Определение остаточных напряжений. Дисс.....докт. техн. наук. – Куйбышев: КПТИ, 1972. – 258 с.
16. Лавров В.Ф. Исследование влияния остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность в условиях концентрации напряжений. Дисс..... канд. техн. наук. – Куйбышев: КуАИ, 1975. – 120 с.
17. Фрейдин Э.И. Исследование остаточных напряжений в резьбе болтов авиационных ГДТ. Автореферат дисс.....канд. техн. наук. – Куйбышев: КуАИ, 1981. – 17 с.
18. Семёнова О.Ю. Разработка методики прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых полых цилиндрических деталей с концентраторами

напряжений. Дисс..... канд. тех. наук. – Самара: СГАУ им. С.П. Королева, 2011. – 112 с.

19. Абробов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. – М.: Машгиз, 1963. – 283 с.

20. Няшин Ю.И., Поздеев А.Д. Остаточные напряжения. Теория и приложение. – М.: Наука, 1982. - 109 с.

21. Михайлов О.Н., Шалаев Ю.П. Остаточные напряжения и усталость шпилек М36*3 из стали 40Х. Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин: сборник статей. – Свердловск: НИИ тяжелого машиностроения Уралмашзавода, 1971. С. 165-180.

22. Точилкин А.А., Иосилевич Г.Д., Петриков В.Г. Исследование технологии накатывания точной резьбы круглыми роликами. – М.: Машиностроение, 1978. – 24 с.

23. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Коновалов Г.В., Минин Б.В. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей. – М.: Б.и., 1992. – 191 с.

24. Подзен А.В. Технологические остаточные напряжения. - М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

25. Кирпичёв В.А, Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15. № 4 (44). С. 81-85.

26. Иванов С.И., Шатунов М.П., Красота В.К., Фрейдин Э.И. Меридиональные остаточные напряжения в резьбовой части болта // Вестник машиностроения. 1982. № 11. С. 36-38.
27. Овсеенко А.Н., Клауч Д.Н., Носов Д.П., Пономарёв А.А., Котов И.В., Терехов В.М. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 4. С. 55-59.
28. Песин М.П. Исследование остаточных напряжений при упрочнении резьбы бурильных труб // Экспозиция Нефть Газ. 2018. № 4 (64). С. 67-69.
29. Трофимов В.В., Яблокова Н.А. Исследование остаточных напряжений в деталях сложной формы ГТД методом рентгеновской тензометрии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. 2011. № 1. С. 112-117.
30. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение остаточных напряжений в калиброванных прутках // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. № 2. С. 109-115.
31. Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 1 (33). С. 106-114.
32. Сазанов В.П. Исследование распределения компонентов остаточного напряжённого состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочнённой детали с кольцевым надрезом методом конечно-элементного моделирования //

Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва. 2012. № 3 (34). С. 158-161.

33. Barsoum Z., Barsoum I. Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM // Engineering Failure Analysis, 2009, no. 16, pp. 449-467.
DOI: [10.1016/j.engfailanal.2008.06.017](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.06.017)

34. Melicher R., Meško J., Novák P., Žmindák M. Residual stress simulation of circumferential welded joints // Applied and Computational Mechanics, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 541-548.

35. Parks D.M. The virtual crack extension method for nonlinear material behavior // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1977, vol. 12, issue 3, pp. 353–364. DOI: 10.1016/0045-7825(77) 90023-8

36. Radaj D. Welding residual stresses and distortion, Berlin, Springer Verlag, 2003.

37. Roger F., Traidia A. Modeling Residual Stresses in Arc Welding, Proceedings of the COMSOL 2010, Boston (2015).

38. Иванычев Д.А. Решение задач термоупругости для анизотропных тел вращения // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105643>

39. Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г. Особенности применения технологии криогенной лазерно-ударно-волновой обработки с целью упрочнения алюминиевых сплавов Д16 // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 3. С. 56-65.
DOI: [10.52261/02346206_2021_3_56](https://doi.org/10.52261/02346206_2021_3_56)

40. Кондатенко Л.А., Миронова Л.И. Остаточные напряжения при радиальной деформации стальных труб // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 70-76. DOI: [10.52261/02346206_2022_1_70](https://doi.org/10.52261/02346206_2022_1_70).

41. Микушев Н.Н., Касьянов С.А., Сазанов В.П. Исследования остаточных напряжений во впадинах резьбы после упрочнения боковых поверхностей выступов с использованием образцов-свидетелей // Международная молодёжная научная конференция «XIII Королёвские чтения» (Самара, 06-08 октября 2015): сборник трудов. – Самара: СГАУ им. академика С.П. Королева, 2015. С. 395-396.
42. Злобин А.С. Оценка влияния остаточных напряжений на малоцикловую усталость резьбовых деталей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 4. С. 118-125.
43. Храмова Д.А., Егорова Д.А., Жилин Я.Д. Расчет и моделирование остаточных напряжений // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 1 (18). С. 1-11.
DOI: [10.18698/2541-8009-2018-1-231](https://doi.org/10.18698/2541-8009-2018-1-231)
44. Каратушин С.И., Храмова Д.А., Бильдюк Н.А. Моделирование и расчет остаточных напряжений в прокатных профилях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 6. С. 28–34. DOI: [10.18698/0536-1044-2017-6-28-34](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-6-28-34)
45. Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. №1 (33). С. 106-114.
46. Александров А.А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: дисс..... канд. техн. наук. – Иркутск, Бурятский государственный университет, 2016. - 165 с.

47. Багмутов В.П., Денисевич Д.С., Захаров И.Н., Романенко М.Д., Фастов С.А. Математическое моделирование остаточных напряжений при импульсном термосиловом поверхностном упрочнении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 3. С. 112-124. DOI: [10.15593/perm.mech/2019.3.12](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.3.12)
48. Плешанова Ю.А. Моделирование остаточных напряжений в деталях машин: дисс.....канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет, 2016. - 144 с.
49. Masoudi Nejad R., Shariati M., Farhangdoost K. Three-dimensional finite element simulation of residual stresses in uic60 rails during the quenching process // Thermal Science, 2017, no. 21 (3), pp. 1301-1307. DOI: [10.2298/TSCI151006013M](https://doi.org/10.2298/TSCI151006013M)
50. Stacey A., Barthelemy J-Y., Leggatt R.H. and Ainsworth R.A. Incorporation of residual stresses into the SINTAP defect assessment procedure // Engineering Fracture Mechanics, 2000, vol. 67, pp. 573-611. DOI:[10.1016/S0013-7944\(00\)00075-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(00)00075-8)
51. Kayser W., Bezold A., Broeckmann C. Simulation of residual stresses in cemented carbides // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016. DOI:[10.1016/j.ijrmhm.2016.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.04.001)
52. Cao J., Gharghoury M.A., Nash, P. Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V build plates // Journal of Materials Processing Technology, 2016, vol. 237 (10), pp. 409–419. DOI:[10.1016/j.jmatprotec.2016.06.032](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.032)

References

1. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Minin B.V., Kirpichev V.A., Kocherov E.P., Golovkin V.V. *Ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti vysokoprochnykh rez'bovykh detalei* (Residual stresses and fatigue resistance of high-strength threaded parts), Samara, Izd-vo SamNTs RAN, 2015, 170 p.
2. Potekhin R.N. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Reshetnevskie chteniya"*, sbornik trudov, Krasnoyarsk, SibGAU, 2013, pp. 433-434.
3. Vasil'ev V.Yu., Galagan G.E., Semin A.E., Shapkin V.S. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2007, no. 119, pp. 50-56.
4. Polonik E.N., Surenskii E.A., Fedotov A.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=76755>
5. Grigorenko V.B., Morozova L.V., Vinogradov S.S. *Trudy VIAM*, 2018, no. 4 (64), pp. 66-74.
6. Abramov V.V. *Utochnenie mekhanicheskikh metodov opredeleniya ostatochnykh napryazhenii* (Refinement of mechanical methods for determining residual stresses), Perm', Dom NTO, 1984, pp. 70-74.
7. Balter M.A. *Uprochnenie detalei mashin* (Hardening of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 184 p.
8. Babei Yu.I., Berezhnitskaya M.F. *Metody opredeleniya ostatochnykh napryazhenii pervogo roda* (Methods for determining residual stresses of the first kind), L'vov, FMI AN USSR, 1980, 64 p.
9. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* (Residual stresses), Moscow, Mashgiz, 1963, 232 p.

10. Glikman L.A. *Trudy Leningradskogo inzhenerno-ekonomicheskogo instituta*, 1960, no. 30, pp. 58-98.
11. Promptov A.I. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya* (Technological residual stresses), Irkutsk, IPI, 1980, 220 p.
12. Bukatyi S.A. *Issledovanie deformatsii detalei, vznikayushchikh posle obrabotki poverkhnosti* (Study of the deformations of parts that occur after surface treatment): dissertation of PhD. Kuibyshev, KPTI, 1979, 167 p.
13. Vakulyuk V.S. *Opredelenie ostatochnykh napryazhenii v shlitsevykh detalyakh* (Determination of residual stresses in splined parts): abstract of the thesis of PhD, Moscow, 1983, 15 p.
14. Grigor'eva I.V. *Opredelenie ostatochnykh napryazhenii v tsilindricheskikh detalyakh* (Determination of residual stresses in cylindrical parts): abstract of the thesis of PhD, Kuibyshev, KPTI, 1978, 23 p.
15. Ivanov S.I. *Opredelenie ostatochnykh napryazhenii*. Diss.....dokt. tekhn. nauk. – Kuibyshev: KPTI, 1972. – 258 s.
16. Lavrov V.F. *Issledovanie vliyaniya ostatochnykh napryazhenii i naklepa na ustalostnuyu prochnost' v usloviyakh kontsentratsii napryazhenii* (Investigation of the influence of residual stresses and work hardening on fatigue strength under conditions of stress concentration): dissertation PhD. Kuibyshev, KuAI, 1975, 120 p.
17. Freidin E.I. *Issledovanie ostatochnykh napryazhenii v rez'be boltov aviatsionnykh GDT* (Investigation of residual stresses in the thread of bolts of aircraft gas turbine engines): abstract dissertation PhD. Kuibyshev, KuAI, 1981, 17 p.

18. Semenova O.Yu. *Razrabotka metodiki prognozirovaniya predela vynoslivosti poverkhnostno uprochnennykh polykh tsilindricheskikh detalei s kontsentratorami napryazhenii* (Development of a Method for Predicting the Endurance Limit of Surface-Hardened Hollow Cylindrical Parts with Stress Concentrators): dissertation of PhD. Samara, SGAU im. S.P. Koroleva, 2011, 112 p.
19. Abrobov V.V. *Ostatochnye napryazheniya i deformatsii v metallakh* (Residual stresses and strains in metals), Moscow, Mashgiz, 1963, 28 p.
20. Nyashin Yu.I., Pozdeev A.D. *Ostatochnye napryazheniya. Teoriya i prilozhenie.* (Residual stresses. Theory and application), Moscow, Nauka, 1982, 109 p.
21. Mikhailov O.N., Shalaev Yu.P. *Ostatochnye napryazheniya i ustalost' shpilek M36*3 iz stali 40Kh. Ostatochnye napryazheniya v zagotovkakh i detalyakh krupnykh mashin* (Residual stresses and fatigue of M36 * 3 studs made of steel 40X. Residual stresses in blanks and parts of large machines). Sverdlovsk, NII tyazhelogo mashinostroeniya Uralmashzavoda, 1971, pp. 165-180.
22. Tochilkin A.A., Iosilevich G.D., Petrikov V.G. *Issledovanie tekhnologii nakatyvaniya tochnoi rez'by kruglymi rolikami* (Investigation of the technology of rolling precise threads with round rollers), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 24 p.
23. Ivanov S.I., Pavlov V.F., Konovalov G.V., Minin B.V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti aviatsionnykh rez'bovykh detalei* (Technological residual stresses and fatigue resistance of aircraft threaded parts), Moscow, B.I., 1992, 191 p.
24. Podzen A.V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya* (Technological residual stresses), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 216 p.

25. Kirpichev V.A, Bukatyi A.S., Filatov A.P., Chirkov A.V. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 15, no. 4 (44), pp. 81-85.
26. Ivanov S.I., Shatunov M.P., Krasota V.K., Freidin E.I. *Vestnik mashinostroeniya*, 1982, no. 11, pp. 36-38.
27. Ovseenko A.N., Klauch D.N., Nosov D.P., Ponomarev A.A., Kotov I.V., Terekhov V.M. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 4, pp. 55-59.
28. Pesin M.P. *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2018, no. 4 (64), pp. 67-69.
29. Trofimov V.V., Yablokova N.A. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovanie*, 2011, no. 1, pp. 112-117.
30. Zaides S.A., Nguen Van Khuan. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*, 2017, no. 2, pp. 109-115.
31. Sazanov V.P., Chirkov A.V., Semenova O.Yu., Ivanova A.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 1 (33), pp. 106-114.
32. Sazanov V.P. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. S.P. Koroleva*, 2012, no. 3 (34), pp. 158-161.
33. Barsoum Z., Barsoum I. Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM, *Engineering Failure Analysis*, 2009, no. 16, pp. 449-467.
DOI:10.1016/j.engfailanal.2008.06.017
34. Melicher R., Meško J., Novák P., Žmindák M. Residual stress simulation of circumferential welded joints, *Applied and Computational Mechanics*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 541-548.

35. Parks D.M. The virtual crack extension method for nonlinear material behavior, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1977, vol. 12, issue 3, pp. 353–364. DOI: 10.1016/0045-7825(77) 90023-8
36. Radaj D. *Welding residual stresses and distortion*, Berlin, Springer Verlag, 2003.
37. Roger F., Traidia A. *Modeling Residual Stresses in Arc Welding*, Proceedings of the COMSOL 2010, Boston (2015).
38. Ivanychev D.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105643>
39. Sakhvadze G.Zh., Sakhvadze G.G. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2021, no. 3, pp. 56-65. DOI: 10.52261/02346206_2021_3_56
40. Kondatenko L.A., Mironova L.I. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2022, no. 1, pp. 70-76. DOI: 10.52261/02346206_2022_1_70.
41. Mikushev N.N., Kas'yanov S.A., Sazanov V.P. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «XIII Korolevskie chteniya»*: sbornik trudov. Samara, SGAU im. akademika S.P. Koroleva, 2015, pp. 395-396.
42. Zlobin A.S. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2015, vol. 14, no. 4, pp. 118-125.
43. Khramova D.A., Egorova D.A., Zhilin Ya.D. *Politekhnikheskii molodezhnyi zhurnal*, 2018, no. 1 (18), pp. 1-11. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-1-231
44. Karatushin S.I., Khramova D.A., Bil'dyuk N.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2017, no. 6, pp. 28–34. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-6-28-34

45. Sazanov V.P., Chirkov A.V., Semenova O.Yu., Ivanova A.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2012, №1 (33), pp. 106-114.
46. Aleksandrov A.A. *Modelirovanie termicheskikh ostatochnykh napryazhenii pri proizvodstve malozhestkikh detalei* (Modeling of thermal residual stresses in the production of low-rigid parts): dissertation of PhD. Irkutsk, Buryatskii gosudarstvennyi universitet, 2016, 165 p.
47. Bagmutov V.P., Denisevich D.S., Zakharov I.N., Romanenko M.D., Fastov S.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2019, no. 3, pp. 112-124. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.12
48. Pleshanova Yu.A. *Modelirovanie ostatochnykh napryazhenii v detalyakh mashin* (Modeling of residual stresses in machine parts): dissertation of PhD. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet, 2016, 144 p.
49. Masoudi Nejad R., Shariati M., Farhangdoost K. Three-dimensional finite element simulation of residual stresses in uic60 rails during the quenching process, *Thermal Science*, 2017, no. 21 (3), pp. 1301-1307. DOI: 10.2298/TSCI151006013M
50. Stacey A., Barthelemy J-Y., Leggatt R.H. and Ainsworth R.A. Incorporation of residual stresses into the SINTAP defect assessment procedure, *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, vol. 67, pp. 573-611. DOI:10.1016/S0013-7944(00)00075-8
51. Kayser W., Bezold A., Broeckmann C. Simulation of residual stresses in cemented carbides, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016. DOI:10.1016/j.ijrmhm.2016.04.001

52. Cao J., Gharghoury M.A., Nash, P. Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V build plates, *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 237 (10), pp. 409–419.
DOI:10.1016/j.jmatprotec.2016.06.032

Статья поступила в редакцию 01.03.2023

Одобрена после рецензирования 10.03.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 01.03.2023; approved after reviewing on 10.03.2023; accepted for publication on 27.04.2023