Вестник научно-технического развития
Bulletin of Science and Technical Development

Номер 176, 2025г.

DOI: 10.18411/vntr2025-176



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

DOI: 10.18411/vntr2025-176

ОГЛАВЛЕНИЕ № 176, 2025

Инна Валерьевна Белова. Исследование деформации материала методами Наказимы и Марчиньяка …….……. **стр. 3 – 10**

Сергей Андреевич Поляков, Кирилл Романович Назаров, Лидия Ивановна Куксенова, Екатерина Михайловна Кулешова. Влияние процесса изнашивания на ресурс подшипников качения ……..……..**стр. 11 – 17**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.



ISSN 2070-6847

DOI: 10.18411/vntr2025-176-1

УДК 621.7-98

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА МЕТОДАМИ НАКАЗИМЫ И МАРЧИНЬЯКА

© Инна Валерьевна Белова
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия
inna_belova@mail.ru

Аннотация. *Проведено сравнительное исследование деформации алюминиевого материала методами Наказимы и Марчиньяка с целью выявления достоинств и недостатков. Сравнение полученных результатов показало, что метод Наказимы более удобен для быстрой оценки формовочных свойств материала, тогда как метод Марчиньяка дает более точные результаты, особенно при исследовании материалов с низкой пластичностью или при наличии концентраторов напряжений. Выявленные достоинства и недостатки обоих методов будут учитываться при планировании дальнейших исследований деформационного поведения алюминиевых сплавов в условиях, приближенных к реальным технологическим процессам.*
Ключевые слова: *дисперсионное упрочнение, микроструктура, механические свойства, деформация.*

STUDY OF MATERIAL DEFORMATION BY NAKAZIMA AND MARCHINIAK METHODS

© Inna Valerevna Belova
Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia
inna_belova@mail.ru

Abstract. *A comparative study of aluminum material deformation by the Nakazima and Marchiniak methods was conducted to identify advantages and disadvantages. Comparison of the obtained results showed that the Nakazima method is more convenient for rapid assessment of the forming properties of the material, while the Marchiniak method gives more accurate results, especially when studying materials with low plasticity or in the presence of stress concentrators. The identified advantages and disadvantages of both methods will be taken into account when planning further studies of the deformation behavior of aluminum alloys under conditions close to real technological processes.*
Keywords: *dispersion hardening, microstructure, mechanical properties, deformation.*

Метод Наказимы, основанный на создании градиента деформации в плоском образце, позволяет получить диаграмму предельных деформаций (FLD) в широком диапазоне. Он относительно прост в реализации и не требует сложного оборудования, но может быть затруднительным при исследовании материалов с высокой чувствительностью к скорости деформации. Метод основан на деформации заготовок из листового металла полусферическим пуансоном Рис. 1. Основным недостатком этого метода является необходимость использования сложных систем смазки для создания условий минимального трения.

Метод Наказимы, несмотря на свою кажущуюся простоту, таит в себе ряд тонкостей, требующих пристального внимания исследователя. Главным препятствием на пути к получению достоверных данных, помимо чувствительности материала к скорости деформации, является, как уже отмечалось, необходимость минимизации трения между пуансоном и образцом. Неправильно подобранная система смазки может привести к значительным погрешностям в определении предельных деформаций, искажая форму диаграммы FLD и, как следствие, приводя к неверным выводам о пластических свойствах исследуемого материала. Идеальная смазка должна обеспечивать равномерное распределение давления по всей контактной поверхности пуансона и образца, предотвращая локальные концентрации напряжений, которые могут вызвать преждевременное разрушение или неравномерную деформацию. В качестве смазочных материалов часто используются различные масла, графитовая смазка, или специальные пасты, состав которых подбирается индивидуально в зависимости от свойств исследуемого материала и условий проведения эксперимента. Однако, даже при использовании высококачественных смазок, полное исключение трения практически невозможно. Поэтому, для повышения точности метода Наказимы, широко применяются различные методики обработки полученных данных. Один из подходов заключается в использовании специальных математических моделей, которые позволяют учесть влияние трения на результаты эксперимента. Эти модели обычно включают в себя параметры, характеризующие коэффициент трения, геометрию пуансона и образца, а также свойства смазочного материала. Параметры модели калибруются на основе данных, полученных в контрольных экспериментах, например, с использованием материалов с хорошо известными пластическими свойствами. Другой важный аспект метода Наказимы – точный контроль процесса деформации. Необходимо обеспечить равномерность приложения нагрузки и точное измерение перемещения пуансона. Для этого используются специальные испытательные машины, оснащенные высокоточными датчиками силы и перемещения. Важно также контролировать температуру образца, так как температура существенно влияет на пластические свойства многих материалов. Для термочувствительных материалов необходимо применять системы термостатирования, обеспечивающие поддержание постоянной температуры в течение всего эксперимента. Кроме того, обработка полученных данных требует тщательного анализа. Необходимо учитывать возможные погрешности измерений, влияние неоднородности материала образца, а также влияние эффекта размерного эффекта, особенно для материалов с мелкозернистой структурой. Для уменьшения влияния этих факторов, целесообразно проводить несколько параллельных экспериментов на образцах, взятых из разных участков исходного листа металла. Статистическая обработка результатов позволяет уменьшить погрешность и повысить достоверность полученных данных. В заключение можно сказать, что метод Наказимы, несмотря на свою относительную простоту, является достаточно сложным инструментом для исследования пластических свойств материалов. Получение достоверных результатов требует тщательного планирования эксперимента, использования высококачественного

оборудования, а также компетентной обработки полученных данных, с учётом всех вышеперечисленных факторов [1]. Только при соблюдении всех этих условий можно получить надежные диаграммы предельных деформаций (FLD) и использовать их для оценки пластических свойств исследуемого материала.

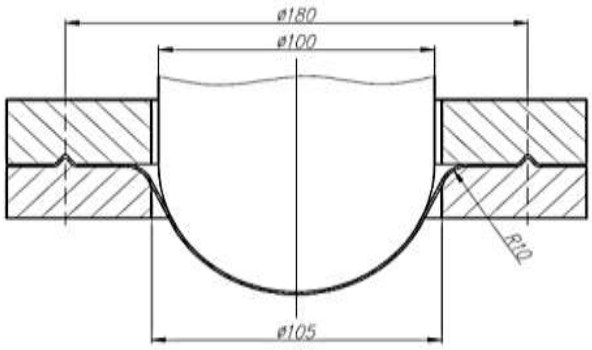


Рис. 1. Схема испытаний по методу Наказимы.

Метод Марчиньяка, напротив, моделирует деформацию в образце с искусственным дефектом, позволяя изучать локализованное разрушение. Он дает более детальную информацию о механизмах разрушения, но требует точной имитации дефекта и может быть чувствителен к параметрам моделирования.

Метод Марчиньяка, в отличие от более грубых приближений, позволяет проникнуть в суть процесса локализованного разрушения материала, предоставляя исследователям доступ к деталям, недоступным при использовании других методов. Его суть заключается в численном моделировании поведения материала с заранее заданным дефектом, например, трещиной, порой, включением или другим структурным несовершенством. Этот искусственный дефект вводится в виртуальную модель образца, после чего на него воздействуют заданными нагрузками, имитируя реальные условия эксплуатации. В процессе моделирования отслеживаются изменения напряжений и деформаций в окрестности дефекта, что позволяет проанализировать стадии развития трещины, определить критические параметры разрушения и, что особенно важно, понять механизмы, приводящие к нему. Ключевым моментом метода Марчиньяка является точность воспроизведения дефекта. Геометрия, размер и свойства дефекта должны быть максимально приближены к реальности. Для этого часто используются данные, полученные с помощью различных экспериментальных методов, таких как сканирующая электронная микроскопия (SEM), компьютерная томография (КТ) или другие методы визуализации. Полученные изображения обрабатываются, и на их основе создается трехмерная модель дефекта, которая затем интегрируется в общую модель образца. Точность этой реконструкции критически важна для достоверности результатов моделирования. Не менее важен и выбор материала модели. Необходимо использовать конститутивные уравнения, точно описывающие поведение материала при различных условиях нагружения, включая пластическую деформацию, упрочнение, повреждение и разрушение. Выбор этих уравнений зависит от типа материала и условий эксперимента. Для некоторых материалов могут использоваться упрощенные модели, например, модель идеального упругопластического тела, тогда как для других требуются более сложные модели, учитывающие влияние различных факторов, таких как температура, скорость деформации, текстура материала и т.д. Параметры моделирования также играют важную роль. Это включает в себя выбор конечно-элементной сетки, метод

решения уравнений, критерии разрушения и другие параметры, которые могут существенно повлиять на результаты. Необходимо проводить тщательную проверку сходимости решения, варьируя параметры сетки и другие параметры моделирования, чтобы убедиться в надежности полученных результатов. Часто используется метод последовательных уточнений сетки, чтобы минимизировать погрешности, связанные с дискретизацией модели. Несмотря на высокую точность и детальность получаемой информации, метод Марчиньяка обладает и некоторыми недостатками. Он требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при моделировании сложных трехмерных задач. Процесс подготовки модели, включающий в себя создание геометрии, задание свойств материала и параметров моделирования, может быть весьма трудоемким. Кроме того, результаты моделирования сильно зависят от точности входных данных, поэтому необходим тщательный контроль и верификация исходной информации. И наконец, метод может быть чувствителен к выбору параметров моделирования, что требует от исследователя высокой квалификации и опыта. Однако, несмотря на эти сложности, метод Марчиньяка остается ценным инструментом для изучения локализованного разрушения материалов. Он позволяет получать глубокое понимание механизмов разрушения, что в свою очередь способствует разработке новых материалов с улучшенными характеристиками прочности и долговечности. Дальнейшее развитие этого метода, включая совершенствование моделей материала и алгоритмов решения, обеспечит ещё более точные и надежные результаты, способствуя прогрессу в области материаловедения и механики разрушения [2].

В методе Марчиньяка для деформации используется цилиндрический пуансон с плоским дном Рис. 2. Чтобы избежать контакта между поверхностью образца и пуансоном, используется дополнительная заготовка с отверстием в центре.

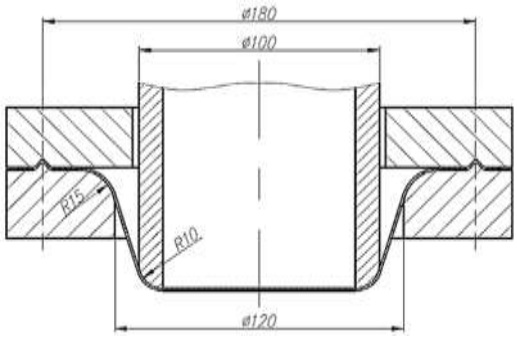


Рис. 2. Схема испытания по методу Марчиньяка.

Исследования проводились на образцах из листового алюминиевого сплава 1163. Отбортовка с отверстием в центре симметрии осуществлялась с помощью универсальной испытательной машины Instron 3382 оборудованной специально разработанной и изготовленной технологической оснасткой.

Вид деформированного состояния листового материала (соотношение главных деформаций в плоскости листа α и относительная продольная деформация ε1 или величины для диаграммы ДПД и соответственно δ2 и δ1 для диаграммы FLD) определяется формой и размерами боковых вырезов на образце Рис. 3. Боковые вырезы могут быть различной формы Рис. 4, но чаще всего в виде сегмента круга - образец без боковых вырезов позволяет получить точку на кривой, которая соответствует двустороннему растяжению α = e2 / e1= -1 или δ2 = - 1 на соответствующих диаграммах Рис. 5.

Образец с максимальными вырезами позволяет получить точку, которая приблизительно соответствует одноосному растяжению, то есть ε1 = - 2 ε2 или δ1 = - 2 δ2.

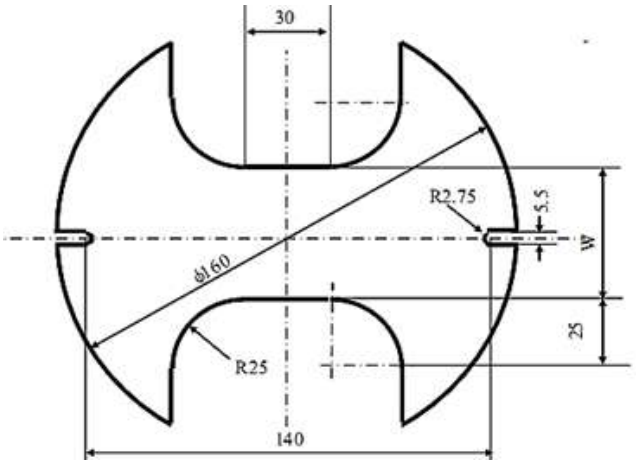


Рис. 3. Форма заготовок для испытания по методам Наказимы и Марчиньяка.

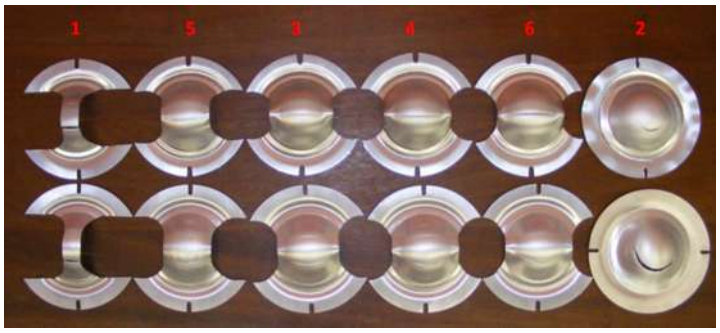


Рис. 4. Вид образцов после испытаний, с внешней и внутренней сторон.

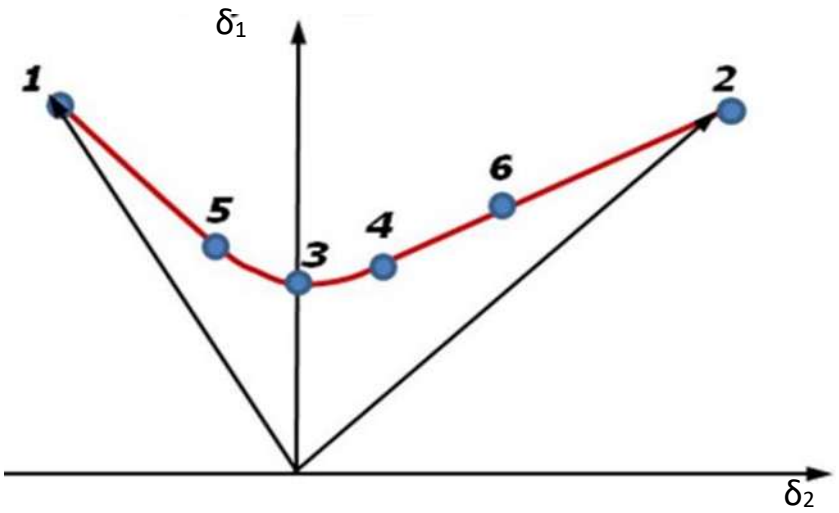


Рис. 5. Построение диаграммы предельных деформаций по результатам испытания образцов с разной величиной боковых вырезов.

Состояние деформации регистрируется путем измерения сетки или рисунка, нанесенного на поверхность образца Рис. 6. Измерение размеров сетки после появления шейки или непрерывной трещины может быть выполнено с помощью измерительного микроскопа.

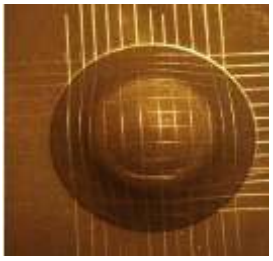


Рис. 6. Образец с нанесенной сеткой после испытания.

Помимо сложности нанесения высококачественного сетчатого покрытия на поверхность заготовки, существует ряд недостатков. Во-первых, необходимо определить момент наступления пластической неустойчивости. Это связано с тем, что по определению это момент разрушения материала. Поскольку визуально определить такой момент сложно, многие исследователи измеряют деформацию (в том числе деформацию шейки в данном случае) после доведения образца до разрушения. Полученная погрешность тем меньше, чем больше диаметр круга на поверхности образца. Приемлемым считается диаметр окружности 8-10 мм. Во-вторых, при ручном расчете деформации возникают следующие ошибки. Деформация, измеренная и рассчитанная этим методом - это деформация поверхности образца, а не нейтральной плоскости, что должно быть более корректно. В-третьих, сетки, особенно царапины, нанесенные лазерным, химическим или другим способом, могут вызвать концентрацию напряжений и исказить результаты испытаний для тонких или очень тонких листов материала.

Сравнение показало, что метод Наказимы более эффективен для определения общей формуемости материала, в то время как метод Марчиньяка предпочтительнее для изучения локальных явлений, связанных с разрушением. Оба метода дополняют друг друга и могут быть использованы совместно для более полного понимания поведения материала при деформации. Сравнение методов Наказимы и Марчиньяка, проведенное в рамках исследования, выявило их взаимную дополняемость в оценке поведения материала под нагрузкой. Метод Наказимы, основанный на анализе интегральных характеристик деформации, демонстрирует высокую эффективность при определении общей формуемости материала. Он позволяет получить обобщенные параметры, такие как предел текучести, коэффициент упрочнения и показатель сопротивления деформации, характеризующие материал в целом. Эти параметры являются важными критериями при выборе материала для конкретного применения, особенно в тех случаях, когда требуется оценка общей способности материала к пластической деформации без детального анализа локальных процессов. Например, при проектировании штампованных деталей, где критична общая геометрическая стабильность заготовки, метод Наказимы предоставляет достаточно информации для выбора подходящего материала. Его преимущество заключается в относительной простоте реализации и меньшей вычислительной сложности по сравнению с методом Марчиньяка. Однако, метод Наказимы не позволяет выявить локальные

особенности деформации, которые могут существенно влиять на прочность и долговечность изделия. Здесь на первый план выходит метод Марчиньяка, ориентированный на анализ локальных напряжений и деформаций. Этот метод, основанный на численном моделировании с использованием конечных элементов, позволяет детально изучить распределение напряжений и деформаций в материале, выявив зоны концентрации напряжений, зарождения и развития трещин, а также другие локальные явления, предшествующие разрушению. Именно благодаря высокому пространственному разрешению, метод Марчиньяка незаменим при анализе хрупкого разрушения, усталостного растрескивания и других видов локальных повреждений материала. Например, при проектировании сварных соединений, где концентрация напряжений в районе сварного шва критически важна, метод Марчиньяка позволяет оценить риск возникновения трещин и оптимизировать конструкцию для повышения надежности. Объединение методов Наказимы и Марчиньяка позволяет создать более полную и достоверную картину поведения материала. Результаты, полученные методом Наказимы, дают общее представление о формуемости материала, позволяя сузить круг потенциальных кандидатов. Затем, метод Марчиньяка применяется для детального анализа выбранных материалов, позволяя оценить их поведение в критических зонах и выявить потенциальные проблемы. Такой комплексный подход минимизирует риски, связанные с неправильным выбором материала, и позволяет создавать более надежные и долговечные изделия. Необходимо отметить, что применение каждого из методов требует определенных ресурсов. Метод Наказимы, будучи экспериментальным, требует проведения ряда испытаний, а обработка результатов относительно проста. Метод Марчиньяка, как метод численного моделирования, требует значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации специалиста для постановки задачи и интерпретации результатов. Однако, инвестиции в применение обоих методов оправданы в случаях, когда требуется высокая надежность и долговечность изделия, а риск отказов недопустимо высок. Поэтому, оптимальная стратегия заключается в рациональном комбинировании этих методов, что позволяет максимизировать точность и достоверность результатов исследования механических свойств материалов.

Список литературы

1. Кравченко Е.Г., Отряскина Т.А., Шершнёв А.А. Оценка качества технологических процессов машиностроительных производств// Ученые записки КнАГТУ. - 2021. - № 7 (55). - С. 79-87.
2. Изосимова С. В. Исследование влияния формы заготовки на точность построения диаграммы предельных деформаций / С. В. Изосимова // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. – № 10. – С. 3. – EDN RZFYCV.
3. Отряскина, Т. А. Исследование деформационных процессов при трении / Т. А. Отряскина, М. В. Хортик // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – № 3(43). – С. 104-109. – EDN GLCCWK.

References

1. Kravchenko E.G., Otrayskina T.A.,Shershnev A.A. Assessment of the quality of technological processes in machine-building industries// Scientific notes of KnAGTU. - 2021. - No 7 (55). - P.79-87. (in Russian)

2. Izosimova S.V. Investigation of the effect of the shape of the workpiece on the accuracy of constructing a diagram of extreme deformations/ S.V. Izosimova// Youth Scientific and Technical Bulletin. - 2013. - No 10. - P.3. (in Russian).
3. Otrayskina T.A. Investigation of deformation processes during friction// Scientific notes of KnAGTU. - 2020. - No 3(43). - P.104-109. (in Russian)

Дата поступления: 21 февраля 2025 г.

DOI: 10.18411/vntr2025-176-2

УДК621.891

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ НА РЕСУРС ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Сергей Андреевич Поляков[2,1], Кирилл Романович Назаров[2], Лидия Ивановна Куксенова[1], Екатерина Михайловна Кулешова[2]
[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
serpol50z@rambler.ru, lkukc@mail.ru, thepenguih@gmail.com, kuleshova.em@mail.ru

***Аннотация**: Показано, что при расчете ресурса подшипника качения необходимо учитывать внутреннюю динамику, возникающую в результате его изнашивания. Показано, что прирост нагрузки на подшипник в виде динамической составляющей влечет за собой пропорциональный рост силы трения. Получено уравнение динамики изнашивания подшипника качения на основе экспериментальных данных, проведенных на лабораторной установке ДМ-28М.*
***Ключевые слова:** подшипник качения, износ, ресурс, износостойкость, динамика изнашивания.*

INFLUENCE OF THE WEAR PROCESS ON THE LIFE OF ROLLING BEARINGS

S.A. Polyakov[1,2], K. R. Nazarov[2], L. I. Kuksenova[1], E. M. Kuleshova[2]
[1] Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2]N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
serpol50z@rambler.ru, lkukc@mail.ru, thepenguih@gmail.com, kuleshova.em@mail.ru

***Abstract.** It is shown that when calculating the service life of a rolling bearing, it is necessary to take into account the internal dynamics that arise as a result of its wear. It is shown that an increase in the load on the bearing in the form of a dynamic component entails a proportional increase in the friction force. An equation for the dynamics of wear of a rolling bearing is obtained based on experimental data conducted on a DM-28M laboratory setup.*
***Keywords:** rolling bearing, wear, resource, durability, wear dynamics.*

Введение. Известно, что в результате эксплуатации в подшипниках качения могут изменяться форма и размер тел качения, включая форму рабочих поверхностей колец подшипников [1]. Данная проблема является малоисследованной, что определяет ее актуальность и новизну. В связи с этим важно рассмотреть те факторы, которые могут оказывать влияние на этот процесс, а также роль и весомость каждого из этих факторов.

Важно также отметить, что изменение формы тел качения, в первую очередь, образование желоба на дорожке качения внешнего кольца подшипника качения должно приводить к изменению динамики его работы. Традиционные методы расчета подшипников качения учитывают только внешнюю динамику в работе подшипнка [2], поэтому вопрос учета внутренней динамики, возникающей в результате изнашивания, при расчете подшипников качения имеет очевидную новизну и актуальность. Дело в том, что наличие внутренней динамики в трибосопряжении приводит, как правило, к существенному изменению динамики достижения предельного износа, иначе говоря, динамики изнашивания. Ярким примером влияния динамики изнашивания на долговечность и ресурс трибосопряжений является работа [3], иллюстрация которой дана на рис. 1. Автор проводил оценку износа и измерение люфта в соединениях шасси самолетов, в которые вводилась обычная смазка и смазка с добавлением модифицированной добавки. Было обнаружено, что с увеличением люфта растут динамические нагрузки, которые приводят к увеличению скорости изнашивания. В случае применения обычной смазки износ по наработке изменялся по экспоненте, а в случае применения модифицированной добавки скорость изнашивания снижалась и износ по наработке изменялся линейно. На рис. 1 показана принципиальная схема определения ресурса сопряжений скольжения.

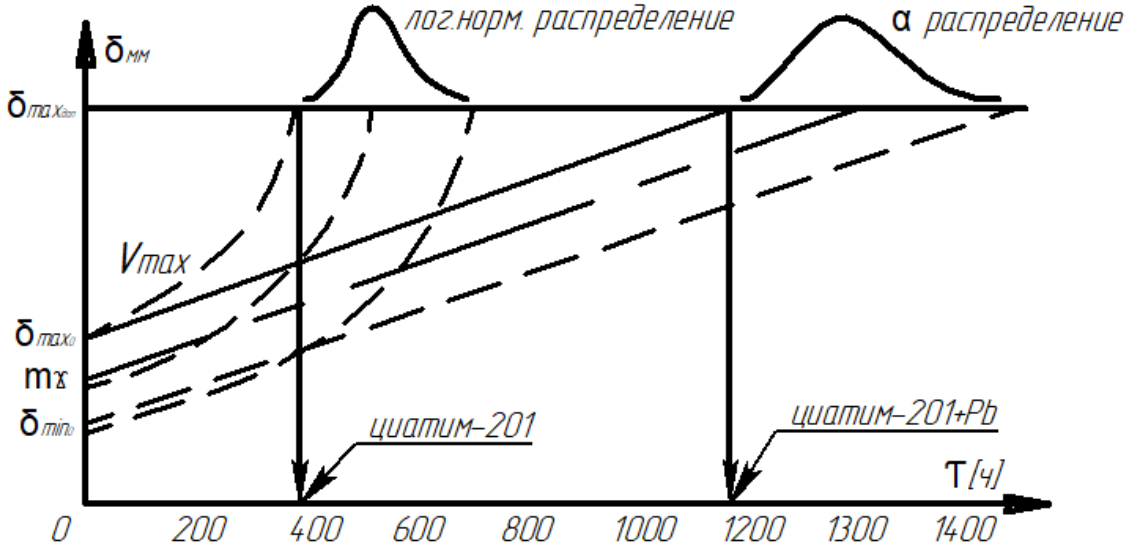


Рис. 1. Результаты испытаний пары вал-втулка, которые проводились при использовании минеральной смазки и при использовании модифицированной добавки.

Испытания показали, что применение модифицированной добавки дает возможность увеличить ресурс пары трения примерно в несколько раз. Данная методика оценки ресурса сопряжений скольжения может быть применена и для оценки ресурса других трибосопряжений. В частности, необходимый аппарат для оценки ресурса на основе предложенной модели динамики изнашивания был разработан (применительно к червячным передачам) в работе [3]. Основанием для подобного подхода применительно к подшипникам

качения является полученная в работе [1] схема изнашивания и основанная на экспериментальных данных форма области изнашивания, показанная на рис. 2.
Очевидно, что изменение формы желоба во внешнем кольце подшипника качения, возникающее в результате изнашивания, будет приводить к изменению динамики работы подшипника, что отразится и на процессе динамики изнашивания, и на оценке ресурса.

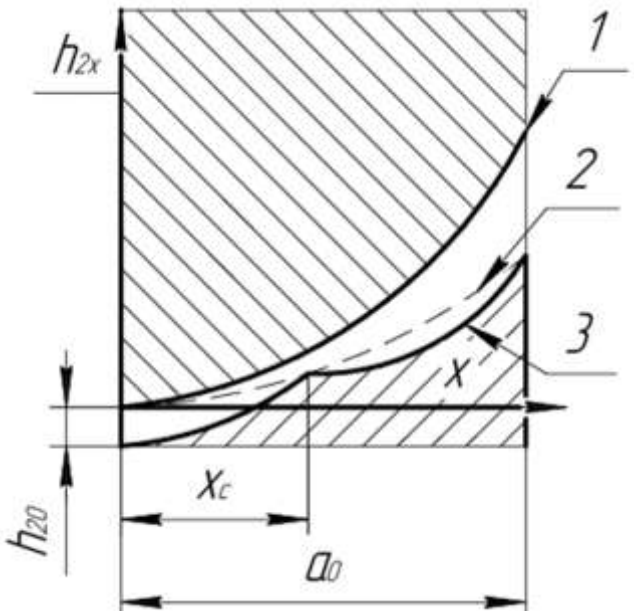


Рис.2. Область контакта шарика с желобом наружного кольца ПК.
1 – шарик; 2 – профиль желоба исходной формы; 3 – профиль изношенного желоба; h_{20} – величина износа наружного кольца подшипника в точке контакта с шариком при нагрузке P_0; x_c – координата мгновенной оси вращения шарика относительно желоба [1].

Целью данной работы является разработка уравнения динамики изнашивания подшипника качения на основе экспериментальных данных.

Материалы и методики исследования. Для разработки уравнения динамики изнашивания необходимо рассмотреть экспериментальные данные по изменению параметров технического состояния подшипника качения. Ниже приводится краткое изложение методики испытаний подшипников качения, более подробно изложенной в работе [5]. Схема лабораторной установки ДМ-28М показана на рис.3.
Испытуемый подшипник размещают в корпусе стенда, вращение внутреннего кольца подшипника происходит в результате передачи вращающего момента от электродвигателя – 1 на вал – 3, входящий в подшипник, через ременную передачу – 2. Описание работы установки дано в работе [5]. Схема работы состоит в том, что, что по мере увеличения нагрузки через нагружающий винт – 12 и динамометрическую скобу – 10 и роста в результате силы трения в подшипнике качения, происходит поворот подвеса – 6 для измерения силы трения в подшипнике относительно шкалы измерительного устройства – 8, а угол поворота указывает на значение силы трения.
Основным дополнением к методике, изложенной выше, является использование тензометрического устройства для замера момента трения на подшипнике, сигнал с которого поступает через тензостанцию на компьютер. Тарировка устройства осуществляется с помощью подвешивания грузов известной массы на рычаге заданной длины с определением

величины вращающего момента через произведение силы на рычаге на длину рычага и сопоставление этого значения с величиной сигнала на экране компьютера. Кроме того, на экране можно фиксировать колебания силы трения, возникающие в результате неравномерности сопротивления вращению внутреннего кольца подшипника в результате действия его конструктивных особенностей. Одной из таких особенностей является зазор в подшипнике, с изменением которого по мере изнашивания подшипника может меняться и частота колебаний силы трения.

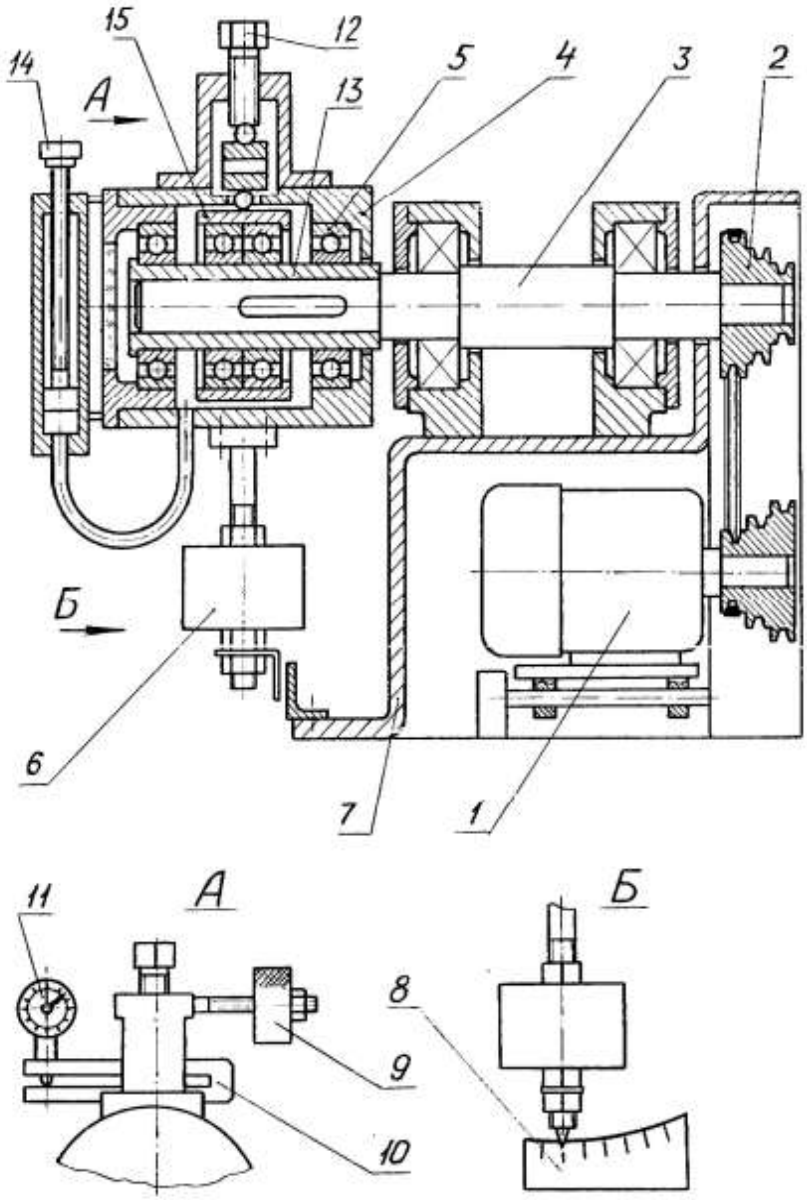


Рис. 3. Схема лабораторной установки ДМ-28М [5]. 1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – вал; 4 – корпус испытательного устройства; 5 – подшипник; 6 - подвес для измерения силы трения; 7 – основание стенда; 8 – шкала измерительного устройства; 9 – регулировочный противовес; 10 – динамометрическая скоба; 11 – индикатор для фиксации деформации скобы; 12 – нагружающий винт; 13 – втулка, на которую напрессованы испытуемые подшипники качения; 14 – смазочное устройство; 15 – испытуемые подшипники качения

Результаты и их обсуждение. Основным результатом испытаний подшипников качения явилось сравнение показателей для новых и изношенных подшипников, рис. 4.

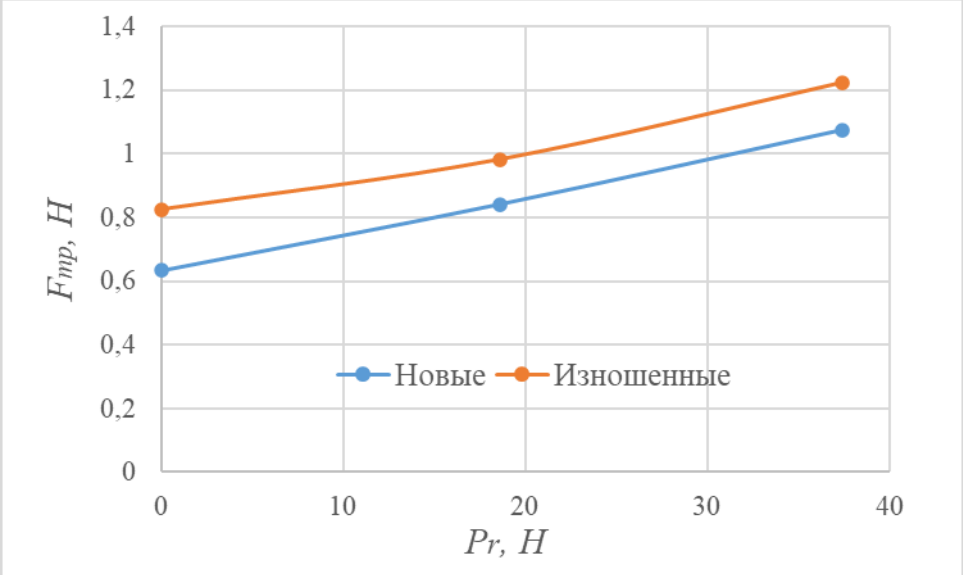


Рис. 4 Зависимость силы трения F_{mp} в подшипнике качения от нормальной нагрузки F_r.

Из графика на рис. 4 видно, что изношенные подшипники качения обладают более высокой силой трения, чем новые. Причиной ухудшения показателей подшипников качения является изменение рельефа трущейся поверхности, как это показано на рис. 2. Наличие данного рельефа ведет к возникновению внутренней динамики подшипника. Как показывает анализ причин повышение силы трения – это образование выемки на желобе и возникновение внутренней динамической составляющей нормальной нагрузки. Очевидно, что взаимодействие шарика с выступом на желобе, образующемся в результате изнашивания, должно давать дополнительную реакцию

$$\Delta P = \frac{m\Delta v}{\Delta t} \text{ (Н)}, \quad (1)$$

где m – масса шарика (кг), Δv – приращение линейной скорости шарика в направлении действия реакции желоба (м/с), Δt – время прохождения выступа (с).

В свою очередь, Δv будет определяться как отношение величины износа h_{20} (определяющего высоту выступа, поскольку под действием нагрузки зазор будет выбран) к времени прохождения выступа Δt, которое определяется отношением длины углубления x_c к линейной скорости шарика, рис. 2.

Констатация факта возникновения динамической составляющей влечет ряд важных выводов. Во-первых, прирост нагрузки в виде динамической составляющей влечет за собой пропорциональный рост силы трения, что наглядно наблюдается на рис.4. Если оценить величину ΔP через данные по размерам области износа, приводимого, например, в работе [1], и параметрам шарика, то на стадии предельного износа эта величина может составлять до 40% прироста к стандартной нагрузке. Это значение хорошо согласуется с данными измерений силы трения (рис.4).

Кроме того, учет динамической составляющей можно провести через введение коэффициента динамичности. Величину коэффициента динамичности K_d можно оценить по формуле:

$$K_d = 1 + \frac{\Delta P}{P}, \quad (2)$$

где – ΔP прирост нормальной силы (Н) в соответствии с формулой (1).
Прирост нормальной силы ведет к приросту контактного давления. Тогда в выражении для интенсивности изнашивания величину контактного давления надо умножать на K_d.

$$J = K_u \left(\frac{pK_d}{HRC} \right)^m, \quad (3)$$

где p – контактное давление (МПа); HRC – твердость материала; K_u, m – экспериментально устанавливаемые коэффициенты.
Однако, в соответствии с ранее приведенными соотношениями, сам коэффициент динамичности зависит от величины износа, поскольку прирост нормальной силы пропорционален величине износа, что следует из формулы (1), а коэффициент динамичности пропорционален приросту нормальной силы (2). Поэтому процесс изнашивания будет развиваться динамически, для чего предлагается разработать соответствующее уравнение, методические основы которого заложены в работе [4].
Для разработки уравнения динамики изнашивания, необходимо сначала оценить зависимости износа от времени, для этого рассмотрим влияние изнашивания на динамическую нагрузку. При достижении некоторого уровня изношенности коэффициент динамичности монотонно растет с ростом износа, то есть, если принять в первом приближении, что рост пропорциональный, можно записать в следующем виде зависимость коэффициента динамичности от износа наружного кольца подшипника:

$$K_d = \frac{h_{20}}{K_a},$$

где K_a — коэффициент пропорциональности (м).
Скорость изнашивания с учетом динамических составляющих определяется по формуле:

$$\frac{dh_{20}}{dt} = K_d J^* v = \frac{h_{20}}{K_a} J^* v, (\text{м/ с}),$$

где J^* – зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки по формуле (3), v – скорость относительного скольжения (м/с).
Таким образом, скорость изнашивания наружного кольца подшипника пропорциональна текущей величине износа. Это значит, что зависимость износа от времени (уравнение динамики изнашивания) имеет экспоненциальный характер и будет выражаться соотношением

$$h_{20}(t) = h_0 \exp\left[\frac{J^*}{K_a} vt \right] (\text{м}), \quad (4)$$

где h_0 – величина приработочного износа. Также, для того чтобы оценить ресурс подшипника качения необходимо определить величину предельного износа, которая зависит от предельно допустимого коэффициента динамичности [K_d].

Выводы

1. Важной причиной снижения работоспособности подшипника качения является изнашивание – образование желоба и возникновение динамической составляющей ΔP, что не нашло отражения в литературе.
2. Процесс изнашивания ведет к экспоненциальному росту как самого износа, так и одной из его причин – коэффициента динамичности, как это показано в формуле (4), что должно существенно сокращать ресурс подшипника качения.
3. Для повышения работоспособности подшипника качения необходимо снижение интенсивности изнашивания, в первую очередь, за счет улучшения условий смазывания и подбора новых смазочных материалов.

Список литературы

1. Павлов В.Г. Ресурс работы радиального шарикоподшипника по условию предельно допустимого износа// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. - № 6. – С.102 – 111.
2. Фомин, М. В. Расчеты опор с подшипниками качения: учебное пособие / М. В. Фомин. 2-е изд. – М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2018. – 58 с.
3. Шепер М.Н. Испытания металлоплакирующих смазочных материалов, их разработка и внедрение. Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения / Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М., 1982. – С. 162-174.
4. Кулешова Е.М. Повышение износостойкости червячных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала. Автореф. диссертации на соиск.уч.степени канд.техн.наук. – М.: БГТУ, 2024. – 23 с.
5. Исследование трения в подшипниках качения: Методические указания к выполнению и оформлению лабораторной работы №2 / Сост. В.М. Плисс. – Хабаровск: Издательство Хабаровского государственного технического университета, 2002. – 15 с.

Дата поступления: 4 апреля 2025 г.