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.

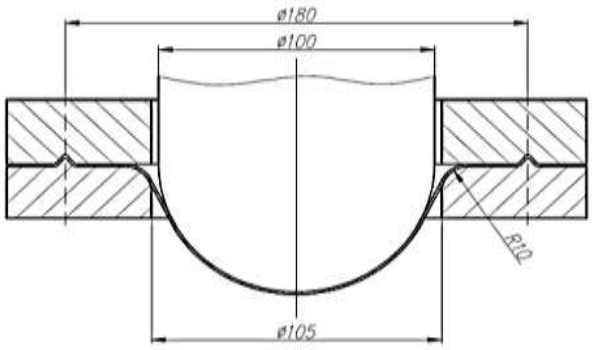


Рис. 1. Схема испытаний по методу Наказимы.

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.

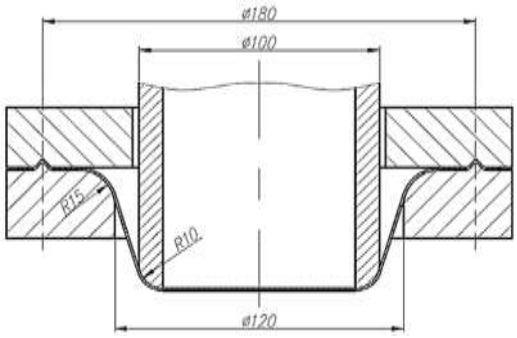


Рис. 2. Схема испытания по методу Марчиньяка.

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.

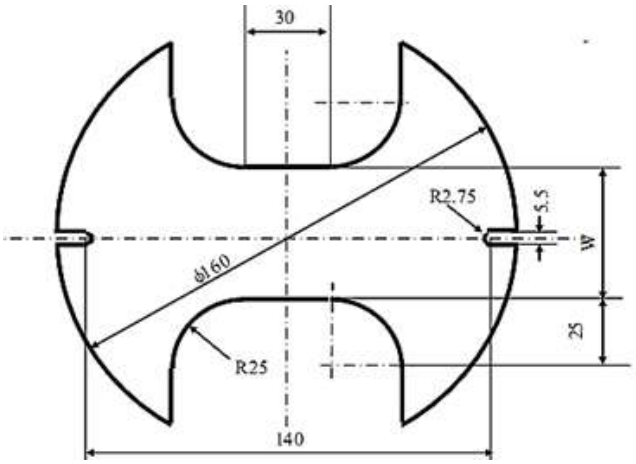


Рис. 3. Форма заготовок для испытания по методам Наказимы и Марчиньяка.

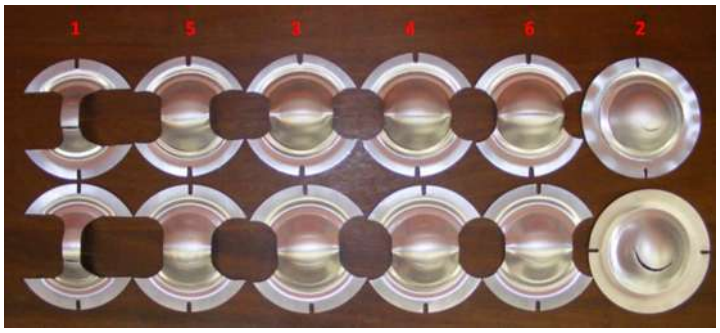


Рис. 4. Вид образцов после испытаний, с внешней и внутренней сторон.

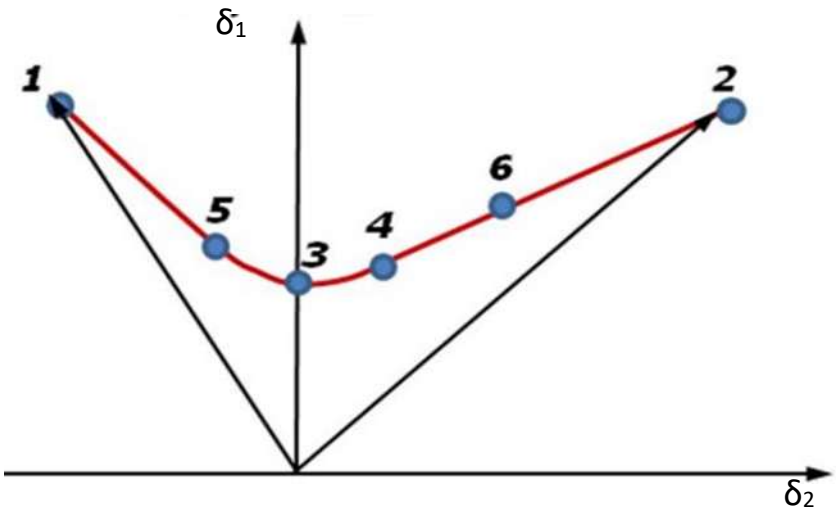


Рис. 5. Построение диаграммы предельных деформаций по результатам испытания образцов с разной величиной боковых вырезов.

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.

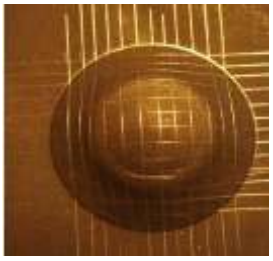


Рис. 6. Образец с нанесенной сеткой после испытания.

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.