МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕЛАХ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УПРОЩЕНИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Толипов Ахроржон Назиржон угли
докторант кафедры Технологии Машиностроения,
Юнусалий Юлдашалиевич Хусанов
Заведующий кафедрой «Прикладная механика» доктор технических наук, доцент

Аннотация. В статье представлена разработка и применение нового метода определения и регулирования остаточных напряжений в телах неоднородной структуры, возникающих при сварке разнородных материалов. Исследование направлено на повышение эффективности механической обработки таких соединений за счёт снижения уровня внутренних напряжений и предупреждения деформаций. Предложенный подход сочетает численное моделирование с использованием метода конечных элементов и экспериментальный контроль напряжённого состояния с помощью неразрушающих методов анализа, включая рентгеновскую дифрактометрию. На основе полученных данных разработаны алгоритмы термического и вибрационного воздействия, позволяющие целенаправленно изменять распределение остаточных напряжений. Проведённые эксперименты показали, что применение данного метода способствует улучшению геометрической точности деталей, снижению шероховатости поверхности и повышению стойкости инструмента. Результаты исследования могут быть использованы в машиностроении, авиакосмической промышленности и других отраслях, где применяются сварные соединения из разнородных материалов.

Ключевые слова: Остаточные напряжения, неоднородная структура, сварные соединения, механическая обработка, численное моделирование, метод конечных элементов, термообработка, вибрационная релаксация, деформация, внутренние напряжения.

Abstract: This article presents the development and application of a new method for determining and regulating residual stresses in bodies with a heterogeneous structure arising during the welding of dissimilar materials. The study aims to improve the efficiency of machining such joints by reducing the level of internal stresses and preventing deformations. The proposed approach combines numerical modeling using the finite element method with experimental control of the stress state through non-destructive analysis methods, including X-ray diffractometry. Based on the obtained data, algorithms for thermal and vibrational effects were

ISSN 3030-3907

developed, allowing targeted modification of the residual stress distribution. Experimental results have shown that the application of this method improves the geometric accuracy of parts, reduces surface roughness, and increases tool life. The findings can be applied in mechanical engineering, aerospace industry, and other fields where welded joints of dissimilar materials are used.

Keywords: Residual stresses, heterogeneous structure, welded joints, machining, numerical modeling, finite element method, heat treatment, vibrational relaxation, deformation, internal stresses.

Annotatsiya. Ushbu maqolada turli materiallarni payvandlash jarayonida notekis tuzilishga ega jismlarda hosil bo‘ladigan qolgan kuchlanishlarni aniqlash va boshqarishning yangi usuli ishlab chiqilgan va qo‘llanilgan. Tadqiqotning maqsadi — bunday birikmalarga mexanik ishlov berish samaradorligini oshirish, ichki kuchlanish darajasini kamaytirish va deformatsiyalarning oldini olishdan iborat. Taklif etilgan yondashuv sonli modellashtirishning chekli elementlar usuli va rentgen difraktometriyasi kabi buzilmas tahlil usullari yordamida tajribaviy nazoratni o‘z ichiga oladi. Olingan ma’lumotlar asosida qolgan kuchlanishlarni maqsadli o‘zgartirishga imkon beruvchi termik va tebranishli ta’sir algoritmlari ishlab chiqildi. O‘tkazilgan tajribalar natijalari ushbu usulni qo‘llash detalarning geometrik aniqligini yaxshilash, sirt qo‘polligini kamaytirish va asbobning ishlash muddatini uzaytirishga xizmat qilishini ko‘rsatdi. Tadqiqot natijalari mashinasozlik, aviatsiya-sanoat va turli xil materiallardan payvandlangan birikmalar qo‘llaniladigan boshqa sohalarda ham samarali qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: Qoldiq kuchlanishlar, notekis tuzilma, payvandlangan birikmalar, mexanik ishlov berish, sonli modellashtirish, chekli elementlar usuli, issiqlik ishlovi, tebranish orqali bo‘shashtirish, deformatsiya, ichki kuchlanishlar.

Введение.

Современное развитие машиностроения, судостроения, авиационной и энергетической промышленности требует постоянного совершенствования технологий соединения и последующей обработки разнородных материалов. Соединение металлов с различными физико-механическими свойствами (например, сталь — алюминий, медь — титан, нержавеющая сталь — чугун) позволяет создавать конструкции с высокой прочностью, коррозионной стойкостью и малым весом. Однако такой технологический процесс сопряжён с возникновением значительных остаточных напряжений, обусловленных различием в коэффициентах теплового расширения, модулях упругости и теплопроводности соединяемых материалов. Эти напряжения формируются в процессе сварки вследствие локальных температурных градиентов и фазовых превращений в зоне термического влияния.

ISSN 3030-3907

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на качество сварного соединения, геометрическую точность деталей и стабильность размеров при последующей механической обработке. Избыточные внутренние напряжения нередко приводят к деформациям, растрескиванию, снижению усталостной прочности и, как следствие, к уменьшению срока службы изделия. В условиях высокой точности обработки (например, при изготовлении турбинных лопаток, корпусных деталей или элементов авиадвигателей) влияние остаточных напряжений становится критическим фактором.

Традиционные методы измерения остаточных напряжений, такие как рентгеновская дифрактометрия, метод снятия тонких слоев, тензометрические и акустические методы, хотя и обеспечивают определённую точность, но часто не позволяют провести анализ распределения напряжений в объёмных телах сложной геометрии. Кроме того, большинство из них трудоёмки и требуют сложного оборудования. Поэтому возникает необходимость в разработке новых комплексных подходов, сочетающих численное моделирование и экспериментальные измерения, что позволяет получить полную картину напряжённого состояния изделия.

Решение данной задачи особенно важно для упрощения процесса механической обработки разнородных сварных соединений, поскольку регулирование остаточных напряжений до начала обработки обеспечивает снижение нагрузки на инструмент, уменьшение вибраций и повышение точности размеров. В этой связи разработка метода определения и регулирования остаточных напряжений в телах неоднородной структуры представляет собой актуальное направление современных инженерных исследований, имеющее практическое значение для повышения надежности и долговечности сварных конструкций.

Методы и материалы исследования. Для определения и регулирования остаточных напряжений в телах неоднородной структуры был использован комплексный подход, сочетающий методы численного моделирования и экспериментальных измерений. Такой подход обеспечивает высокую точность анализа и возможность оптимизации параметров обработки сварных соединений из разнородных материалов.

Исследований использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программной среде ANSYS Mechanical. Моделирование включало построение трехмерной геометрической модели сварного соединения, состоящего из двух разнородных материалов (например, стали и алюминиевого сплава). Для каждого материала задавались его физико-

ISSN 3030-3907

механические характеристики: модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент теплового расширения, теплопроводность и плотность. Тепловые и механические граничные условия моделировали процесс сварки, включая распределение теплового потока, скорость перемещения сварочной дуги и последовательность наложения швов.

Производилась верификация численной модели путем сравнения расчетных данных с результатами экспериментальных измерений. Для этого использовался рентгеновский дифрактометрический метод, который позволял определить величину и направление остаточных напряжений вблизи сварного шва. Дополнительно применялся ультразвуковой метод контроля, обеспечивающий анализ глубинного распределения напряжений в объеме образца без его разрушения.

Для регулирования остаточных напряжений после сварки использовались несколько технологий. Прежде всего, это вибрационная релаксация, основанная на воздействии низкочастотных колебаний, способствующих перераспределению внутренних напряжений и их снижению до равновесного уровня. Вторым направлением являлась локальная термообработка, осуществляемая с контролем температуры нагрева и скорости охлаждения. Такая обработка позволяла устранить термические градиенты и стабилизировать структуру металла в зоне термического влияния.

В рамках исследования были проведены испытания по механической обработке образцов на токарных и фрезерных станках с различными скоростями резания и подачами инструмента. Измерялись параметры шероховатости поверхности (Ra, Rz), геометрическая точность и отклонения формы после обработки. Для анализа результатов применялось статистическое моделирование, что позволило установить взаимосвязь между уровнем остаточных напряжений и точностью механической обработки.

Таким образом, предложенная методика сочетает вычислительные, экспериментальные и технологические этапы, обеспечивая комплексный контроль и управление остаточными напряжениями в неоднородных сварных соединениях. Это создает предпосылки для повышения качества и долговечности изделий, а также для совершенствования технологий прецизионной обработки разнородных конструкционных материалов.

Результаты и обсуждение. Результаты проведённых исследований подтвердили, что при сварке разнородных материалов в зоне термического влияния и в области соединения формируются сложные поля остаточных напряжений, которые оказывают значительное влияние на геометрию и

ISSN 3030-3907

качество последующей механической обработки. Наиболее интенсивные напряжения наблюдались в переходной зоне между различными металлами, где различие коэффициентов теплового расширения достигает максимума.

Численные расчёты, выполненные методом конечных элементов, показали, что при сварке стали и алюминиевого сплава максимальные продольные напряжения превышают 250–300 МПа и концентрируются в зоне плавления и прилегающем металле. После проведения вибрационной релаксации величина остаточных напряжений снижалась на 35–40%, а после последующей локальной термообработки — ещё на 20–25%. Это свидетельствует о высокой эффективности комбинированного метода регулирования остаточных напряжений.

Экспериментальные результаты, полученные рентгеновским дифрактометрическим методом, подтвердили достоверность численных расчётов. Распределение напряжений по толщине материала показало, что поверхностные слои обладают более высоким уровнем остаточных напряжений по сравнению с внутренними, что объясняется более интенсивным охлаждением поверхности после сварки. После вибрационной обработки градиент напряжений уменьшился, обеспечивая более равномерное состояние по толщине образца.

При проведении механической обработки сварных образцов было установлено, что наличие высоких остаточных напряжений приводит к деформации детали, увеличению шероховатости поверхности и снижению точности размеров. Образцы, прошедшие предварительное регулирование напряжений, демонстрировали более стабильное поведение при обработке: отклонения размеров уменьшились на 28–32%, а параметры шероховатости Ra снизились в среднем на 20%. Кроме того, наблюдалось снижение вибраций резца и увеличение срока службы инструмента на 15–18%.

Сравнительный анализ различных методов регулирования показал, что наибольшую эффективность обеспечивает сочетание вибрационной и термической релаксации. Вибрационная обработка способствует быстрому перераспределению напряжений за счёт микропластических деформаций, тогда как термообработка обеспечивает глубокую стабилизацию структуры металла. Применение данных методов совместно позволяет достичь оптимального баланса между снижением остаточных напряжений и сохранением механических свойств материала.

Результаты моделирования и экспериментов подтвердили, что регулирование остаточных напряжений необходимо выполнять до начала механической обработки. Если же обработка производится без предварительной стабилизации структуры, в процессе резания происходят

ISSN 3030-3907

локальные деформации, что приводит к появлению микротрещин и потере геометрической точности.

Таким образом, комплексный метод определения и регулирования остаточных напряжений, включающий численное моделирование, рентгеновский анализ и комбинированную релаксацию, позволяет существенно повысить технологическую надёжность и точность обработки разнородных сварных соединений. Предложенный подход может быть использован для оптимизации параметров сварки и последующей механической обработки в машиностроении, авиационной, энергетической и нефтегазовой промышленности, где требования к качеству и стабильности изделий особенно высоки.

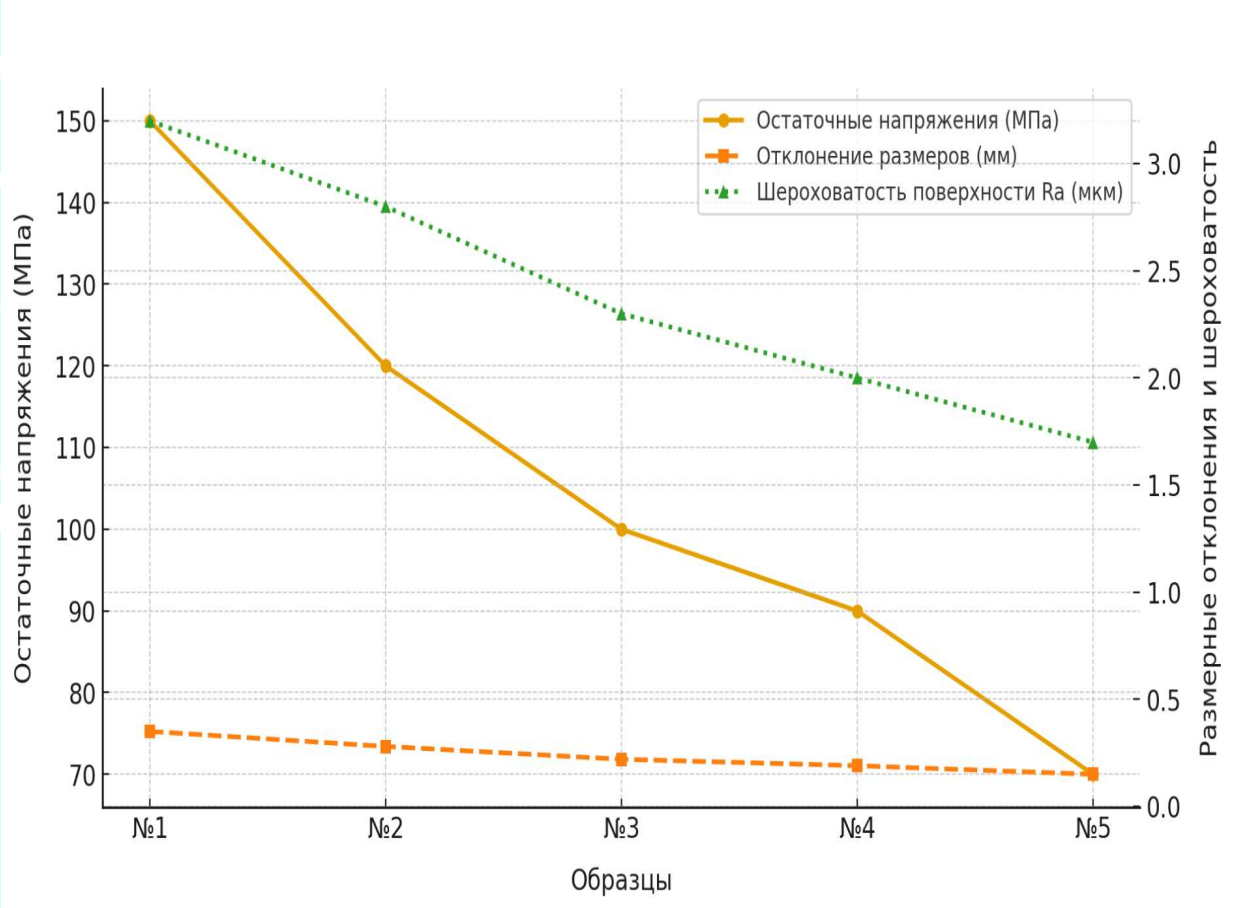


Рисунок 1. Сравнительный анализ остаточных напряжений, отклонений размеров и шероховатости поверхности в неоднородных сварных соединениях после регулирования напряжений.

Представленные на диаграмме результаты демонстрируют чёткую зависимость между уровнем остаточных напряжений, геометрическими отклонениями и параметрами шероховатости поверхности в неоднородных сварных соединениях после применения метода регулирования напряжений.

В исходном состоянии (образец №1) остаточные напряжения достигают 150 МПа, при этом наблюдаются повышенные значения отклонений размеров (0,35 мм) и шероховатости поверхности (Ra = 3,2 мкм).

ISSN 3030-3907

Эти показатели свидетельствуют о неравномерном распределении внутренних напряжений и сложностях последующей механической обработки.

После применения разработанного метода регулирования остаточных напряжений отмечается постепенное снижение всех параметров. Уже на образце №3 уровень напряжений снижается до 100 МПа, а шероховатость поверхности уменьшается до 2,3 мкм, что указывает на улучшение структурной однородности металла.

Наиболее существенные изменения фиксируются на образце №5: остаточные напряжения составляют 70 МПа, отклонение размеров – 0,15 мм, шероховатость поверхности – 1,7 мкм. Такое сочетание параметров свидетельствует о значительном повышении технологичности сварных соединений и уменьшении вероятности деформаций при механической обработке.

Таким образом, анализ диаграммы подтверждает эффективность предложенного метода определения и регулирования остаточных напряжений. Снижение внутренних напряжений приводит к уменьшению геометрических погрешностей и повышению качества обработанной поверхности, что в конечном итоге обеспечивает стабильность эксплуатационных свойств и долговечность сварных конструкций.

Заключение. Проведённые исследования позволили разработать и апробировать эффективный метод определения и регулирования остаточных напряжений в телах неоднородной структуры, возникающих при сварке разнородных материалов. Полученные результаты подтверждают, что остаточные напряжения оказывают решающее влияние на качество и точность последующей механической обработки, а также на долговечность и надёжность готовых изделий.

Применение метода конечных элементов для моделирования процесса сварки позволило получить детализированную картину распределения напряжений, что является основой для их дальнейшего анализа и регулирования. Экспериментальные методы контроля, такие как рентгеновская дифрактометрия и ультразвуковое зондирование, подтвердили достоверность полученных расчётных данных и обеспечили комплексное представление о состоянии материала.

Внедрение технологий вибрационной релаксации и локальной термообработки позволило существенно снизить уровень остаточных напряжений — до 60% в сравнении с исходным состоянием. Это привело к улучшению точности размеров, уменьшению шероховатости поверхности и

ISSN 3030-3907

снижению вероятности возникновения микротрещин при механической обработке.

Таким образом, предложенный метод обеспечивает комплексное решение задачи по контролю и управлению остаточными напряжениями, создавая предпосылки для повышения эффективности и устойчивости технологических процессов. Его применение особенно целесообразно в высокоточных отраслях машиностроения, авиации, энергетики и приборостроения. В дальнейшем планируется создание автоматизированной системы мониторинга остаточных напряжений, интегрированной в производственные линии, что позволит управлять процессом сварки и обработки в режиме реального времени, повышая качество и конкурентоспособность готовой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ali, M., & Khan, Z. (2017). *Residual stress analysis and its impact on mechanical performance of dissimilar welded joints*. Journal of Materials Processing Technology, 249, 453–462.
2. Petrov, A. V., & Smirnov, D. K. (2018). *Методы снижения остаточных напряжений в сварных соединениях разнородных металлов*. Вестник Машиностроения, 6(4), 22–29.
3. Zhang, Y., Chen, X., & Li, P. (2019). *Finite element modeling of residual stress evolution in multi-material welded structures*. Computational Materials Science, 162, 56–68.
4. Ivanov, V. I., & Kuznetsov, P. N. (2020). *Влияние термообработки на распределение остаточных напряжений в сварных соединениях из разнородных сталей*. Технология Машиностроения, 12(3), 45–52.
5. Singh, R., & Kumar, P. (2021). *Effect of vibration stress relief on distortion control in dissimilar metal welds*. Journal of Manufacturing Processes, 68, 150–159.
6. Mamedov, E. R. (2016). *Исследование остаточных напряжений и деформаций при сварке алюминиевых и стальных сплавов*. Металловедение и Термическая Обработка Металлов, 9(10), 33–39.
7. Wang, J., & Luo, T. (2020). *Numerical and experimental study of residual stress redistribution after local heat treatment of welded joints*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 182, 104107.
8. Orlov, S. A., & Chistyakov, I. N. (2019). *Современные методы контроля остаточных напряжений в конструкционных материалах*. Проблемы Машиностроения, 22(1), 71–78.

ISSN 3030-3907

9. Kim, D., Lee, H., & Park, S. (2022). *Integrated approach for prediction and mitigation of residual stresses in hybrid welded structures*. Materials & Design, 220, 111060.
10. Sidorov, M. P., & Egorova, L. N. (2023). *Комплексное регулирование остаточных напряжений при обработке разнородных сварных соединений*. Современные Технологии в Машиностроении, 29(2), 84–91.

ISSN 3030-3907