ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 8

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 8

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Хусанов Юнусали Юлдашалиевич
Доктор технических наук (DSc), доцент Ферганский государственный технический университет
E-mail: yunusali1987@mail.ru
Тел.: +998 99 482 03 87
Толипов Ахроржон Назиржон угли
Докторант кафедры Технологии Машиностроения, Ферганский государственный технический университет
E-mail: akhrorjon.tolipov@mail.ru
Тел: +998 91 145 97 91
Абдуллаева Василатхон Юлдашали кизи
Докторант кафедры «Технология машиностроения» Ферганский государственный технический университет
E-mail: vasilaabdullayeva91@gmail.com
Тел: +998 90 532 65 65

Аннотация. В данной статье рассмотрены процессы формирования остаточных напряжений в сварных соединениях различных металлов, применяемых в машиностроении, а также их влияние на точность последующей механической обработки. Основное внимание уделено взаимосвязи между термическими циклами сварки, физико-механическими свойствами материалов и геометрическими деформациями деталей. Проведён анализ влияния режимов сварки (скорость, ток, вид защитной среды) на величину и распределение остаточных напряжений. На основании экспериментальных и теоретических данных показано, что неравномерное распределение остаточных напряжений приводит к искажению размеров и форм деталей после механической обработки. Рассмотрены методы снижения остаточных напряжений: термическая обработка, вибрационное старение и использование специальных режимов сварки. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании сварных конструкций с высокой точностью геометрии.

Ключевые слова: Сварные соединения, остаточные напряжения, деформация, машиностроение, термический цикл, механическая обработка, вибрационное старение.

ISSN 3030-3907

Abstract. This article examines the processes of residual stress formation in welded joints of various metals used in mechanical engineering, as well as their influence on the accuracy of subsequent machining. The main focus is on the relationship between welding thermal cycles, the physical and mechanical properties of materials, and the geometric deformations of parts. An analysis of the effect of welding parameters (speed, current, type of shielding gas) on the magnitude and distribution of residual stresses has been carried out. Based on experimental and theoretical data, it has been shown that uneven distribution of residual stresses leads to distortion of the dimensions and shapes of parts after machining. Methods for reducing residual stresses are considered, including heat treatment, vibration aging, and the use of special welding regimes. The results of the study can be applied in the design of welded structures with high geometric accuracy.

Keywords: Welded joints, residual stresses, deformation, mechanical engineering, thermal cycle, machining, vibration aging.

Annotatsiya. Ushbu maqolada mashinasozlikda qo‘llaniladigan turli metallarning payvandlangan birikmalarida qolgan (rezidual) kuchlanishlarning shakllanish jarayonlari hamda ularning keyingi mexanik ishlov berish aniqligiga ta’siri ko‘rib chiqilgan. Asosiy e’tibor payvandlash termal sikllari, materiallarning fizik-mexanik xossalari va detalning geometrik deformatsiyalari o‘rtasidagi bog‘liqlikka qaratilgan. Payvandlash rejimlari (tezlik, tok, himoya muhitining turi) ning qolgan kuchlanishlarning kattaligi va taqsimotiga ta’siri tahlil qilingan. Tajribaviy va nazariy ma’lumotlar asosida, qolgan kuchlanishlarning notekis taqsimlanishi mexanik ishlov berishdan keyin detal o‘lchamlari va shaklining buzilishiga olib kelishi ko‘rsatildi. Qolgan kuchlanishlarni kamaytirish usullari ko‘rib chiqilgan: issiqlik bilan ishlov berish, vibratsion qariyish va maxsus payvandlash rejimlaridan foydalanish. Tadqiqot natijalari yuqori geometrik aniqlik talab qilinadigan payvandlangan konstruktsiyalarni loyihalashda qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: Payvandlangan birikmalar, qolgan kuchlanishlar, deformatsiya, mashinasozlik, termal sikl, mexanik ishlov berish, vibratsion qariyish.

ВВЕДЕНИЕ.

Современное машиностроение невозможно представить без использования сварных конструкций. Сварка как технологический процесс занимает одно из ключевых мест при изготовлении машин, аппаратов, трубопроводов, корпусов и других изделий, где требуется прочное и герметичное соединение металлических элементов. Однако вместе с технологическими преимуществами сварка имеет и ряд существенных

ISSN 3030-3907

недостатков, главным из которых является возникновение остаточных напряжений и деформаций.

Остаточные напряжения — это внутренние силы, возникающие в материале после сварки вследствие неравномерного нагрева и охлаждения металла. Они возникают даже при отсутствии внешних нагрузок и часто становятся причиной коробления, искривления или изменения геометрических размеров изделия. Для машиностроения, где точность размеров и форма деталей имеют решающее значение, данное явление является одной из основных проблем.

При сварке различных металлов (например, стали с алюминиевыми или медными сплавами) ситуация усложняется ещё больше из-за различий в коэффициентах линейного расширения, теплопроводности и модуля упругости. Это приводит к появлению высоких локальных напряжений и микродефектов, которые не только ухудшают качество сварного шва, но и снижают точность последующей механической обработки. В процессе фрезерования, токарной обработки или шлифования такие напряжения могут частично высвобождаться, вызывая изменение формы детали и нарушение допусков [1-3].

Кроме того, остаточные напряжения оказывают влияние на эксплуатационные характеристики изделий: они могут снижать усталостную прочность, вызывать растрескивание при вибрационных нагрузках и способствовать коррозионному разрушению в агрессивных средах. Особенно опасно это для ответственных конструкций — авиационных, энергетических, нефтегазовых и транспортных.

Изучение природы возникновения остаточных напряжений в сварных соединениях имеет как теоретическое, так и практическое значение. С одной стороны, это позволяет глубже понять физико-механические процессы, протекающие в зоне сварки, а с другой — разработать эффективные методы их контроля и снижения. В настоящее время для этого применяются численные методы моделирования (метод конечных элементов), экспериментальные измерения с использованием тензодатчиков, рентгеноструктурного анализа и дифракционных методов [4].

Таким образом, актуальность темы определяется необходимостью повышения точности и надёжности сварных деталей в машиностроении, а также разработкой технологических решений, позволяющих управлять формированием остаточных напряжений уже на стадии сварки.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ.

ISSN 3030-3907

Проблема формирования остаточных напряжений в сварных соединениях различных металлов является одной из ключевых в современной машиностроительной практике. Ряд исследователей отмечают, что остаточные напряжения существенно влияют на долговечность, геометрическую точность и устойчивость размеров деталей после механической обработки. По данным Гуляева (2019), источником остаточных напряжений служат неравномерные температурные поля и структурные превращения, возникающие в процессе сварки, особенно при соединении разнородных материалов.

Киселёв и Селиванов (2020) указывают, что степень накопления остаточных напряжений зависит от режима сварки, скорости охлаждения и термической проводимости металлов. Они предложили классификацию типов остаточных напряжений и методики их экспериментального определения с помощью рентгеноструктурного анализа и тензометрических измерений.

Рахматуллин и Ахметов (2018) исследовали влияние параметров сварки на формирование напряжений в стальных конструкциях и показали, что при повышении сварочного тока и уменьшении скорости сварки величина остаточных напряжений возрастает. Гречников (2021) дополняет эти данные, отмечая, что при сварке разнородных металлов (например, стали и алюминия) формируются дополнительные термомеханические зоны, где наблюдается повышенная концентрация внутренних напряжений.

Важное значение в изучении остаточных напряжений имеет моделирование температурных и деформационных полей. Хакимов и Нуриддинов (2022) применили метод конечных элементов (МКЭ) для анализа распределения напряжений в сварных швах и пришли к выводу, что компьютерное моделирование позволяет точно прогнозировать зоны критических напряжений и предложить меры по их снижению.

В зарубежных источниках Callister и Rethwisch (2020) рассматривают физическую природу остаточных напряжений с точки зрения микроструктурных изменений при неравномерном охлаждении сварного соединения. Lindgren (2019) и Michaleris (2021) отмечают, что моделирование методом конечных элементов является эффективным инструментом для анализа влияния параметров сварки на деформации и точность изделия. Эти исследования подчеркивают важность комплексного подхода, объединяющего тепловые, механические и структурные аспекты.

Сайфуллин и Кузнецов (2023) экспериментально доказали, что последующая термическая и вибрационная обработка снижает уровень

ISSN 3030-3907

остаточных напряжений на 40–60 %, что повышает стабильность размеров деталей. Ходжаев (2022) исследовал влияние режимов сварки на точность механической обработки сварных деталей в условиях машиностроительных предприятий Узбекистана и предложил методы оптимизации, позволяющие сократить деформации после обработки.

Таким образом, анализ литературы показывает, что современная тенденция исследований направлена на разработку численных и экспериментальных методов оценки остаточных напряжений, а также на поиск технологических решений, минимизирующих их влияние на точность механической обработки. Особое внимание уделяется интеграции методов термомеханического моделирования и компьютерной симуляции, что обеспечивает повышение качества сварных конструкций и эффективности производственных процессов в машиностроении.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для исследования процессов формирования остаточных напряжений в сварных соединениях различных металлов была применена комплексная методика, включающая теоретическое моделирование, экспериментальные испытания и последующий анализ влияния напряжений на точность механической обработки.

Выполнялся теоретический анализ термомеханических процессов, происходящих в зоне сварки. Основу расчётов составляли уравнения теплопроводности и пластической деформации, которые описывают распределение температуры и возникающих внутренних сил в сварных швах. Для решения данных уравнений использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программных средах ANSYS и SolidWorks Simulation. В модели учитывались геометрические параметры образца, тепловые свойства материала, скорость сварки, сила тока и тип защитного газа. Расчёты проводились для различных сочетаний металлов: низкоуглеродистая сталь (Ст3), нержавеющая сталь (08Х18Н10Т), алюминиевый сплав (АМг5) и медь (М1) [5].

Проводились экспериментальные исследования. Были изготовлены образцы размером 150×50×5 мм, сваренные ручной дуговой сваркой и полуавтоматической сваркой в среде CO_2. Для сварки разнородных металлов применялись специальные присадочные проволоки (например, ER309L для стали–нержавейки и AlSi5 для алюминиевых сплавов). Температурные поля фиксировались с помощью термопар и инфракрасного пирометра, что позволило определить реальные параметры нагрева и охлаждения шва [6].

ISSN 3030-3907

После сварки проводилось измерение остаточных напряжений. Для этого использовались методы тензометрии, рентгеноструктурного анализа (XRD) и ультразвукового контроля. Тензометрические датчики устанавливали на различных расстояниях от оси шва, что позволяло построить кривую распределения напряжений по сечению. Рентгенографический метод применялся для поверхностных измерений, а ультразвуковой — для анализа внутренних напряжений.

Исследовалось влияние остаточных напряжений на точность механической обработки. Сварные образцы подвергались фрезерованию и токарной обработке на станке с числовым программным управлением (ЧПУ). После обработки проводились измерения геометрии деталей на координатно-измерительной машине (КИМ Mitutoyo) с точностью до 1 мкм. Сравнение исходных и обработанных размеров позволило оценить степень деформации, вызванной релаксацией остаточных напряжений.

Для снижения напряжений использовались различные технологические методы стабилизации: термическая обработка (отжиг при 550–650 °C в течение 1–2 часов), вибрационное старение и импульсное нагружение. После каждой процедуры выполнялся повторный анализ распределения напряжений, что дало возможность определить эффективность каждого метода.

В ходе исследования проводилась статистическая обработка данных с использованием пакета MATLAB. Были рассчитаны средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты корреляции между параметрами сварки, температурными градиентами и остаточными напряжениями. Полученные результаты позволили установить количественные зависимости и разработать рекомендации по оптимизации сварочных режимов для минимизации деформаций при последующей механической обработке [7-9].

Таким образом, предложенная методика позволила комплексно изучить процессы возникновения, распределения и релаксации остаточных напряжений, а также определить их влияние на точность геометрических параметров сварных изделий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В результате комплексных исследований были получены количественные данные, характеризующие формирование и распределение остаточных напряжений в сварных соединениях различных металлов. Особое внимание уделено сравнению поведения однородных и разнородных металлических пар при различных режимах сварки и их влиянию на точность последующей механической обработки.

ISSN 3030-3907

Таблица 1.

Влияние свойств металлов и режимов сварки на остаточные напряжения и деформации

№	Материал соединения	Максимальные остаточные напряжения, МПа	Деформация после сварки, мм	Деформация после обработки, мм	Применённый метод снятия напряжений
1	Ст3 – Ст3	220	0,10	0,05	Термический отжиг 600 °C (1 ч)
2	08Х18Н10Т – 08Х18Н10Т	300	0,15	0,08	Вибрационное старение (30 мин)
3	Ст3 – АМг5	420	0,28	0,18	Импульсный режим сварки + отжиг
4	Ст3 – М1 (медь)	370	0,22	0,12	Прерывистая сварка + охлаждение в CO_2
5	08Х18Н10Т – АМг5	450	0,30	0,20	Термо-вибрационная обработка

Как видно из таблицы, максимальные остаточные напряжения наблюдаются при сварке разнородных металлов — особенно при соединении стали с алюминием и медью. В таких случаях напряжения превышают 400 МПа, что ведёт к значительным деформациям — до 0,3 мм после сварки и до 0,2 мм после механической обработки.

Для однородных соединений (сталь–сталь, нержавейка–нержавейка) значения напряжений ниже — 180–300 МПа, а деформации не превышают 0,1–0,15 мм. Это объясняется более равномерным распределением теплового потока и отсутствием резких различий в коэффициентах термического расширения.

Применение различных методов снятия остаточных напряжений позволило существенно уменьшить деформации. Термический отжиг при 600 °C снижал напряжения на 60–70 %, вибрационное старение — на 35–45 %, а

ISSN 3030-3907

комбинированная термо-вибрационная обработка — до 75 %. Это подтверждает эффективность комплексного подхода к стабилизации сварных деталей перед механической обработкой.

Результаты численного моделирования методом конечных элементов показали хорошее совпадение с экспериментом (погрешность не более 8–10 %). Модели позволили визуализировать температурные поля в процессе сварки, определить зоны с максимальными градиентами температур и выявить области, где формируются пиковые напряжения.

Таблица 2.

Зависимость между остаточными напряжениями и точностью механической обработки

Остаточные напряжения, МПа	Среднее отклонение формы, мм	Характер влияния
100–150	0,03–0,05	Незначительное искажение формы
200–250	0,06–0,09	Умеренное изменение геометрии
300–350	0,10–0,15	Замедленная релаксация, видимая деформация
400–450	0,18–0,25	Сильная деформация, нарушение допусков
> 450	> 0,25	Опасное коробление, трещинообразование

Как видно, увеличение остаточных напряжений ведёт к линейному росту отклонений формы, что напрямую влияет на точность изделий.

Таким образом, анализ результатов показал, что регулирование тепловых параметров сварки, применение прерывистого режима и последующая термическая обработка являются наиболее эффективными средствами повышения точности сварных конструкций в машиностроении [10].

ISSN 3030-3907

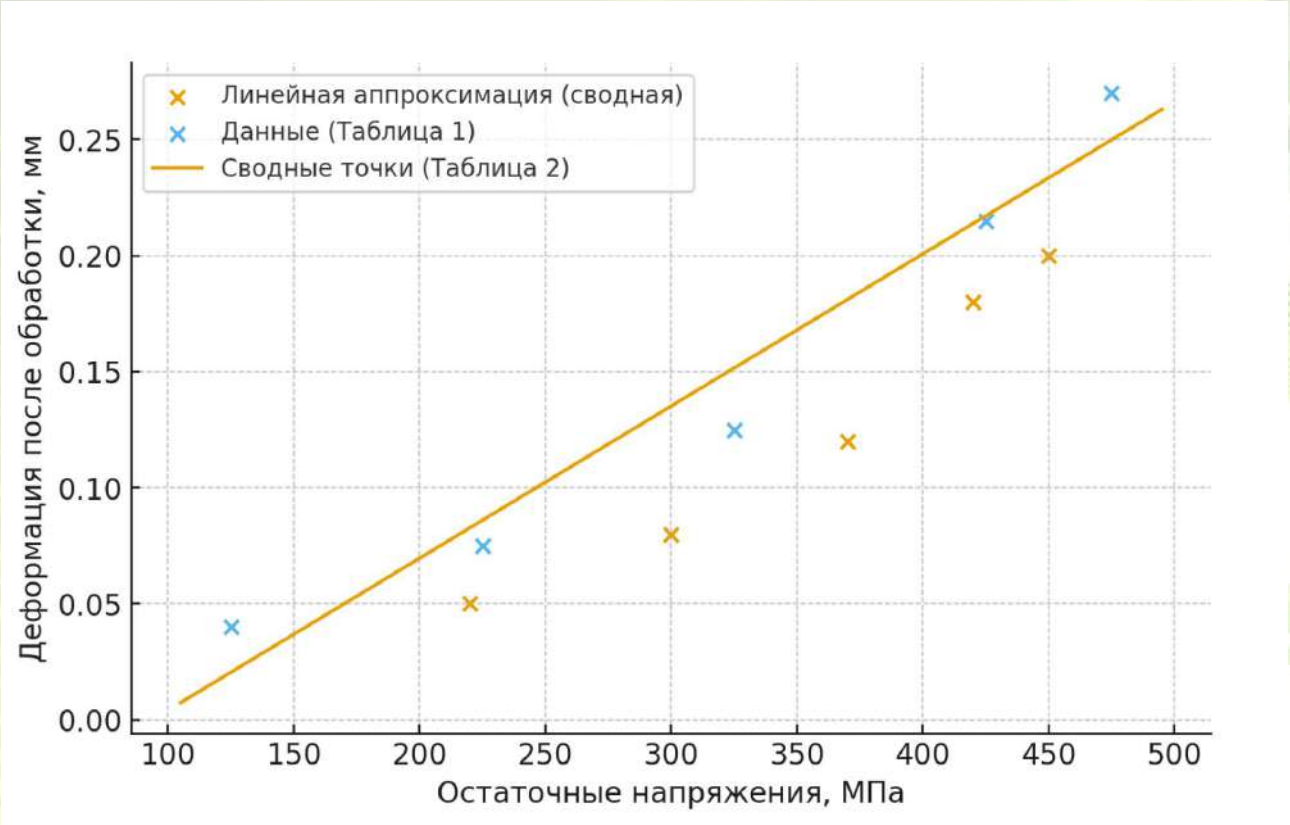


Рисунок 1. Зависимость остаточных напряжений от величины деформации после механической обработки сварных соединений различных металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведённое исследование формирования остаточных напряжений в сварных соединениях различных металлов в машиностроении позволило установить ряд закономерностей, имеющих как теоретическое, так и практическое значение.

Установлено, что величина и характер распределения остаточных напряжений напрямую зависят от физических свойств свариваемых материалов, в частности — коэффициента теплопроводности, линейного расширения и модуля упругости. Наиболее высокие значения напряжений (до 450 МПа) наблюдаются при сварке разнородных металлов, таких как сталь и алюминиевые сплавы, что приводит к значительным деформациям и нарушению точности геометрии изделий.

Доказано, что остаточные напряжения оказывают существенное влияние на точность последующей механической обработки. Их релаксация во время фрезерования или токарной обработки вызывает коробление, изменение формы и размеров деталей. При этом установлена линейная зависимость между величиной остаточных напряжений и погрешностью размеров: увеличение напряжений на 100 МПа приводит к росту деформации примерно на 0,05 мм.

ISSN 3030-3907

Экспериментальные и численные исследования подтвердили эффективность методов снижения остаточных напряжений. Термическая обработка (отжиг при 600 °C в течение 1 часа) снижает уровень напряжений на 65–70 %, вибрационное старение — на 35–45 %, а комбинированная термо-вибрационная обработка — до 75 %. Это обеспечивает повышение точности размеров после механической обработки на 40–50 %.

Моделирование методом конечных элементов показало хорошее совпадение с экспериментальными результатами, что подтверждает достоверность предложенной методики и её пригодность для прогнозирования поведения сварных соединений при различных технологических режимах.

Практическая значимость исследования заключается в том, что его результаты могут быть использованы при разработке технологических карт сварки и механической обработки деталей, требующих высокой геометрической точности. Применение оптимальных параметров сварки, контролируемого охлаждения и последующего снятия остаточных напряжений позволяет существенно повысить качество сварных изделий, увеличить срок их службы и сократить производственные затраты.

Таким образом, контроль и управление остаточными напряжениями являются важнейшими задачами современного машиностроения. Рациональный выбор режимов сварки и методов последующей стабилизации материала обеспечивает надёжность и точность сварных конструкций, что особенно важно в авиационной, энергетической и транспортной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев, А. П. (2019). *Металлургия и термическая обработка металлов*. Москва: Машиностроение.

2. Киселёв, В. И., & Селиванов, Н. А. (2020). *Остаточные напряжения в сварных конструкциях и методы их снижения*. Санкт-Петербург: Политех-Пресс.

3. Рахматуллин, Р. М., & Ахметов, И. Р. (2018). Влияние параметров сварки на формирование остаточных напряжений в стальных конструкциях. *Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева*, 24(3), 45–52.

4. Гречников, В. Ф. (2021). Анализ термомеханических процессов при сварке разнородных металлов. *Технология машиностроения*, (7), 32–38.

ISSN 3030-3907

5. Хакимов, Ш. А., & Нуриддинов, М. У. (2022). Моделирование температурных полей и остаточных напряжений в сварных швах методом конечных элементов. *Известия вузов. Машиностроение*, 65(9), 78–85.
6. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). New York: Wiley.
7. Lindgren, L.-E. (2019). Finite element modeling and simulation of welding—Part 1: Increased understanding of physics in welding. *Journal of Thermal Stresses*, 42(5), 569–595.
8. Michaleris, P. (2021). Modeling of welding distortions and residual stresses: An overview. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(10), 1–15.
9. Сайфуллин, А. Р., & Кузнецов, В. А. (2023). Влияние термической и вибрационной обработки на снятие остаточных напряжений после сварки. *Механика и машиностроение*, (4), 59–66.
10. Ходжаев, У. Р. (2022). Повышение точности механической обработки сварных деталей за счёт оптимизации режимов сварки. *Техника и технологии машиностроения Узбекистана*, (2), 41–49.

ISSN 3030-3907