

УДК 621.791.75:621.9.014

**ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ
РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В МАШИНОСТРОЕНИИ: МЕХАНИЗМЫ
ФОРМИРОВАНИЯ, МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И СПОСОБЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ**

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*

Аннотация

Сварные соединения разнородных металлов (сталь/нержавеющая сталь, сталь/алюминий, сталь/титан) широко применяются в машиностроении для обеспечения прочности, снижения массы и коррозионной стойкости. Несоответствие свойств материалов порождает асимметричные поля остаточных напряжений, влияющие на несущую способность и усталостный ресурс деталей. В работе исследованы механизмы формирования остаточных напряжений в соединениях сталь 45 / нержавеющая сталь 12X18H10T методом конечных элементов в ANSYS и экспериментально (рентгеновская дифрактометрия, метод сверления). Установлено, что максимальные растягивающие напряжения (380–450 МПа) формируются в зоне термического влияния стали 45. Смена последовательности сварки и вибрационная обработка снижают напряжения на 35–58%.

Ключевые слова: остаточные напряжения; разнородные сварные соединения; машиностроение; термомеханическое моделирование; рентгеновская дифрактометрия; регулирование напряжений; послесварочная обработка; обрабатываемость резанием

Abstract: Dissimilar metal welded joints (steel/stainless steel, steel/aluminium, steel/titanium) are widely used in mechanical engineering to achieve combined requirements of strength, low weight and corrosion resistance. The mismatch of material properties generates asymmetric residual stress fields that affect load-bearing capacity and fatigue life of components. This paper investigates the formation mechanisms of residual stresses in steel 45 / stainless steel 12Kh18N10T joints by the finite element method in ANSYS and experimentally (X-ray diffraction, hole-drilling method). It is established that peak tensile stresses (380–450 MPa) form in the heat-affected zone of steel 45. Changing the welding sequence and applying vibratory stress relief reduce stresses by 35–58%.

Keywords: residual stresses; dissimilar welded joints; mechanical engineering; thermomechanical modelling; X-ray diffractometry; stress relief; post-weld treatment; machinability

Annotatsiya: Geterogen metallarning payvandlangan birikmalari (po'lat/zanglamaydigan po'lat, po'lat/alyuminiy, po'lat/titan) mashinasozlikda mustahkamlik, yengil vazn va korroziyaga chidamlilikni bir vaqtda ta'minlash uchun keng qo'llaniladi. Material xususiyatlarining mos kelmasligi qoldiq kuchlanishlarning assimetrik maydonlarini keltirib chiqaradi va bu esa detallarning ko'tarish qobiliyati va charchash muddatiga ta'sir qiladi. Mazkur ishda po'lat 45 / zanglamaydigan po'lat 12X18N10T birikmalari uchun qoldiq kuchlanishlarning hosil bo'lish mexanizmlari ANSYS dasturida cheklangan elementlar usuli va eksperimental usullar (rentgen difraktometriya, teshik parmalash usuli) yordamida o'rganildi. Maksimal cho'zilish kuchlanishlari (380–450 MPa) po'lat 45 termik ta'sir zonasida hosil bo'lishi aniqlandi. Payvandlash ketma-ketligini o'zgartirish va vibratsion ishlov berish kuchlanishlarni 35–58% gacha kamaytiradi.

Kalit so'zlar: qoldiq kuchlanishlar; geterogen payvandlangan birikma; mashinasozlik; termomexanik modellashtirish; rentgen difraktometriya; kuchlanishlarni tartibga solish; payvanddan keyingi ishlov; kesish qobiliyati

1. Введение

Применение сварных соединений разнородных металлических материалов в машиностроении существенно расширилось за последние десятилетия. Это обусловлено необходимостью одновременного выполнения взаимоисключающих конструктивных требований: высокой прочности и малой массы, коррозионной стойкости и теплопроводности, износостойкости поверхности и пластичности основного тела детали [1, 2]. Типичные области применения включают биметаллические валы и роторы, переходные соединения трубопроводов в нефтехимической и энергетической отраслях, корпусные детали из разнородных сталей в транспортном машиностроении.

В отличие от однородных сварных соединений, разнородные соединения характеризуются принципиальным несоответствием теплофизических и механических свойств свариваемых металлов по обе стороны сварного шва: коэффициентов линейного термического расширения (КТР), теплопроводности, предела текучести и модуля упругости. При сварке это несоответствие порождает несимметричные температурные циклы на каждой стороне соединения, создавая неоднородные поля пластических деформаций, которые при охлаждении до температуры окружающей среды проявляются в виде сложных распределений остаточных напряжений [3].

Остаточные напряжения в сварных соединениях оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики деталей машин. Растягивающие остаточные напряжения снижают предел усталости, стимулируют развитие коррозионного растрескивания под нагрузкой, а при последующей механической обработке вызывают непредсказуемые деформации заготовки и флуктуации сил резания, что напрямую ухудшает точность обработки и стойкость инструмента [4, 5]. Сжимающие остаточные напряжения, напротив, благоприятно сказываются на усталостной прочности и износостойкости поверхностного слоя.

Несмотря на практическую значимость проблемы, комплексное исследование остаточных напряжений в разнородных сварных соединениях — охватывающее их формирование, экспериментальное измерение и регулирование постсварочными методами — остаётся недостаточно разработанным в научной литературе. Большинство публикаций посвящено либо одной паре материалов, либо одному методу измерения без сравнительного анализа методов снижения напряжений [6, 7].

Цель настоящей работы: (1) проанализировать механизмы формирования остаточных напряжений в разнородных стальных соединениях; (2) экспериментально измерить и верифицировать методом МКЭ распределение остаточных напряжений в соединениях сталь 45 / 12X18H10T, выполненных различными способами сварки; (3) оценить эффективность изменения последовательности наложения швов и вибрационной обработки в снижении пиковых растягивающих остаточных напряжений.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы исследования

Исследование проводилось на стыковых сварных образцах из конструкционной стали 45 (ГОСТ 1050-88) и аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T (ГОСТ 5632-72). Данная пара материалов широко представлена в разнородных соединениях химического машиностроения, транспортной и ремонтной отраслей. Основные тепломеханические свойства исследуемых материалов приведены в таблице 1. Несоответствие предела текучести (355 МПа против 240 МПа), модуля упругости (200 ГПа против 196 ГПа) и, особенно, коэффициента линейного термического расширения ($11,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ против $16,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) определено как основной фактор асимметрии остаточных напряжений.

Таблица 1. Тепломеханические свойства свариваемых материалов при 20 °C

Свойство	Ед. изм.	Сталь 45	12X18H10T
Предел текучести, σ_t	МПа	355	240
Предел прочности, σ_b	МПа	600	520
Модуль упругости, E	ГПа	200	196
Коэффициент Пуассона, ν	—	0,28	0,30
Теплопроводность, λ	Вт/(м·К)	48	15
Удельная теплоёмкость, c_p	Дж/(кг·К)	478	500
Плотность, ρ	кг/м ³	7850	7920
Коэф. линейного расширения, α	10 ⁻⁶ К ⁻¹	11,6	16,6
Температура плавления, $T_{пл}$	°С	1480	1425

2.2. Подготовка образцов и режимы сварки

Для исследований изготовлены плоские стыковые сварные образцы размером 200×100×12 мм. Оценивались три типа присадочных материалов: (А) аустенитные электроды ЭА-395/9; (Б) присадка на никелевой основе ЭНХ-1 (аналог ENiCrFe-3); (В) аустенитные электроды ОЗЛ-6. Изучались две последовательности наложения швов: (П1) стандартная однонаправленная; (П2) знакопеременная (обратная) последовательность. Параметры сварки: ток 130–170 А; напряжение дуги 22–26 В; скорость сварки 12–18 м/ч; предварительный подогрев со стороны стали 45 до 150 °С. Разделка кромок: V-образная, угол раскрытия 60°, зазор 2 мм. Все образцы прошли визуальный контроль и контроль капиллярной дефектоскопией перед измерением остаточных напряжений.

2.3. Измерение остаточных напряжений

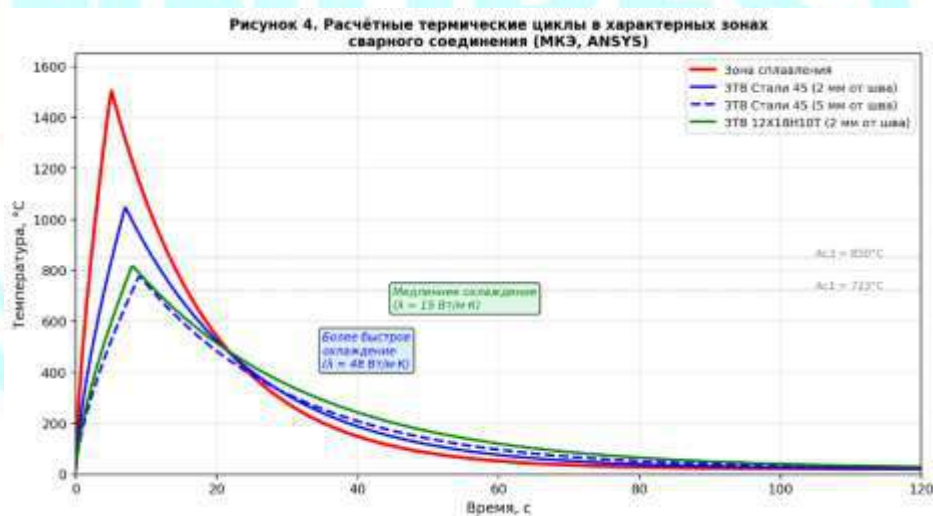
Применялись два взаимодополняющих экспериментальных метода. Рентгеноструктурный анализ (РСА) выполнен на портативном дифрактометре XSTRESS 3000 с излучением Cr-K α по методу $\sin^2\psi$, рефлекс {211} α -железа

при $2\theta \approx 156^\circ$. Измерения проводились в 15 точках поперечного сечения с шагом 3 мм. Метод сверления отверстия (МСО) по ГОСТ Р ИСО 12004-2 применялся для верификации результатов РСА: отверстия диаметром 2 мм засверливались пошагово до глубины 1,8 мм с наклеенными тензорозетками ХБМ RY61-1.5/120R.

2.4. Конечно-элементное моделирование

Совместная термомеханическая конечно-элементная модель разработана в среде ANSYS Mechanical 2021 R2. Геометрия шва дискретизирована восьмиузловыми объёмными элементами SOLID185 с размером сетки 0,5 мм в зоне термического влияния (ЗТВ) и 3 мм в основном металле. Источник теплоты аппроксимирован двойным эллипсоидом Голдака. Фазовые превращения в ЗТВ стали 45 учтены по модели JMAK. Расчёт выполнен в два этапа: нестационарный тепловой анализ и упругопластический структурный анализ с кинематическим упрочнением.

Рисунок
Расчётные
термические
циклы в
характерных
зонах
сварного
соединения
(МКЭ, ANSYS
Mechanical
2021 R2)



4.

2.5. Послесварочная вибрационная обработка

Вибрационная обработка (ВО) применялась с использованием электродинамического вибратора (частота 20–200 Гц, амплитуда ускорения 2–8 g). Резонансная частота системы «образец–приспособление» составила 54 Гц; обработка проводилась на этой частоте в течение 30 минут. Эффективность ВО

оценивалась путём сравнения распределений остаточных напряжений до и после обработки методом РСА.

3. Результаты

3.1. Распределение остаточных напряжений: экспериментальные данные

Измеренные распределения продольных остаточных напряжений по сечению шва во всех образцах демонстрировали характерную асимметричную картину. На стороне стали 45 растягивающие остаточные напряжения достигали максимума 380–450 МПа на расстоянии 5–8 мм от линии сплавления, приближаясь к пределу текучести данного материала. Это существенно выше, чем пиковые напряжения на стороне нержавеющей стали (220–280 МПа). В металле шва растягивающие напряжения составили 180–320 МПа в зависимости от присадочного материала. В зонах основного металла, удалённых от шва более чем на 30 мм, напряжения имели сжимающий характер (–50...–150 МПа) с обеих сторон.

Среди трёх исследованных присадочных материалов наилучшие результаты показала присадка на никелевой основе ЭНХ-1 (вариант Б): максимальные растягивающие напряжения на стороне стали 45 составили 382 МПа, а градиент напряжений через ЗТВ оказался наиболее плавным. Это объясняется промежуточным значением КТР и повышенной пластичностью данного материала.



Рисунок 1. Распределение продольных остаточных напряжений по поперечному сечению сварного соединения сталь 45 / 12X18H10T для трёх присадочных материалов

Таблица 2. Пиковые продольные остаточные напряжения для трёх присадочных материалов

Зона измерения	Присадка А (ЭА-395/9), МПа	Присадка Б (ЭНиХ-1), МПа	Присадка В (ОЗЛ-6), МПа
ЗТВ стали 45 (макс. растяжение)	445 ± 22	382 ± 18	430 ± 25
Металл шва	285 ± 15	195 ± 12	310 ± 17
ЗТВ нержав. стали (макс. растяжение)	274 ± 14	220 ± 11	265 ± 16
Основной металл Стали 45 (сжатие)	-110 ± 8	-95 ± 7	-120 ± 9
Основной металл нержав. стали (сжатие)	-60 ± 5	-52 ± 5	-65 ± 6

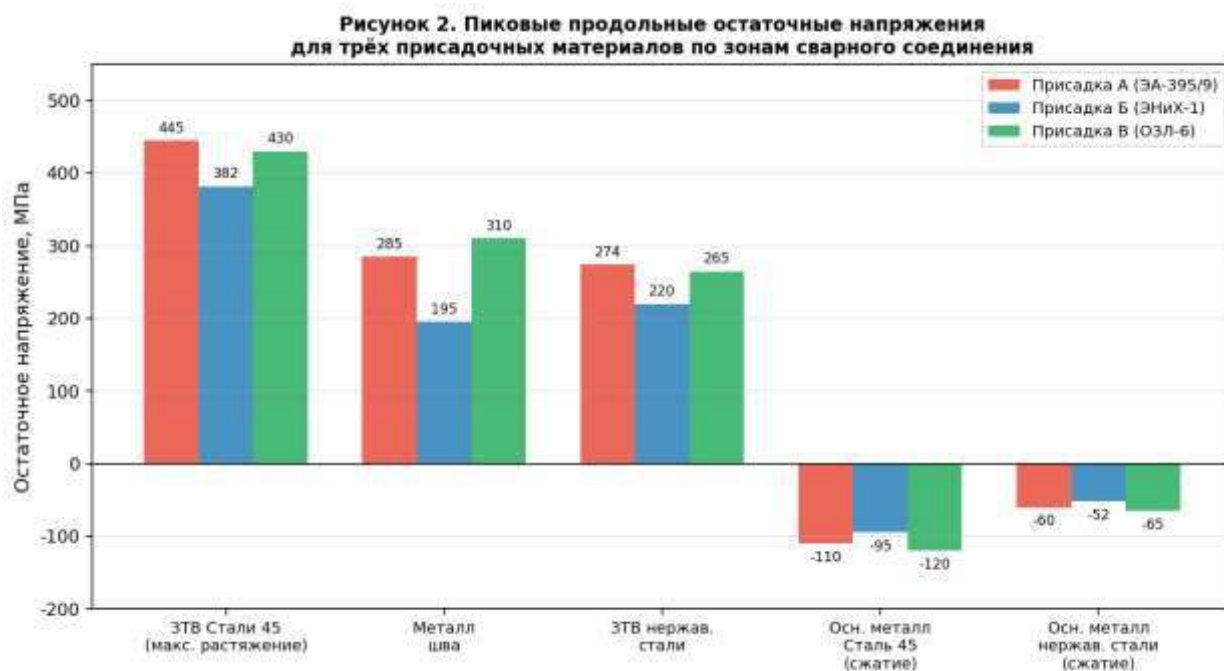


Рисунок 2. Пиковые продольные остаточные напряжения для трёх присадочных материалов по зонам сварного соединения

3.2. Верификация МКЭ и анализ температурного поля

Прогнозируемое МКЭ распределение продольных остаточных напряжений хорошо согласуется с данными РСА: максимальное отклонение составило 8,4% для 3ТВ стали 45 и 11,2% для 3ТВ нержавеющей стали. Расчётная максимальная температура в зоне сплавления достигла 1510 °С; 3ТВ стали 45 нагревалась до 850–1100 °С (выше температуры A_{c3}), 3ТВ нержавеющей стали — до 600–950 °С. Асимметричный термический цикл — сталь 45 охлаждается быстрее вследствие более высокой теплопроводности ($\lambda = 48$ против 15 Вт/(м·К)) — создаёт большие пластические сжимающие деформации на стороне стали 45 при высокотемпературной фазе, которые при охлаждении переходят в растягивающие остаточные напряжения, превышающие значения на стороне нержавеющей стали на 55–65%. Параметрический анализ показал, что повышение температуры предварительного подогрева с 150 °С до 300 °С снижает пиковые напряжения приблизительно на 18%.

3.3. Влияние последовательности наложения швов

Знакопеременная последовательность наложения швов (П2) снизила пиковые растягивающие напряжения в ЗТВ стали 45 на 35% по сравнению со стандартной последовательностью (П1): с 445 МПа до 290 МПа при присадке А и с 382 МПа до 250 МПа при присадке Б. МКЭ правильно воспроизводит это снижение (расчётные значения: 42% и 38% соответственно). Улучшение объясняется более симметричной историей тепловложения при знакопеременной схеме.

3.4. Эффективность вибрационной обработки

Послесварочная вибрационная обработка снизила пиковые растягивающие остаточные напряжения в ЗТВ стали 45 на 41–48% для всех вариантов присадочных материалов (таблица 3). Наибольшее абсолютное снижение зафиксировано для присадки А (с 445 МПа до 234 МПа). При этом ВО не оказала значимого влияния на сжимающие напряжения в зонах основного металла. Измерения твёрдости до и после ВО не выявили существенных изменений (разброс ± 3 HRC).

Таблица 3. Влияние послесварочных методов обработки на пиковые растягивающие напряжения в ЗТВ стали 45

Вид обработки	Присадка А, МПа	Присадка Б, МПа	Присадка В, МПа	Снижение, %
После сварки (П1)	445	382	430	—
Обратная последовательность (П2)	290	250	280	35–38 %
Вибрационная обработка (П1+ВО)	234	220	240	41–48 %

П2 Вибрационная обработка	+	185	178	195	55–58 %
---------------------------------	---	-----	-----	-----	---------

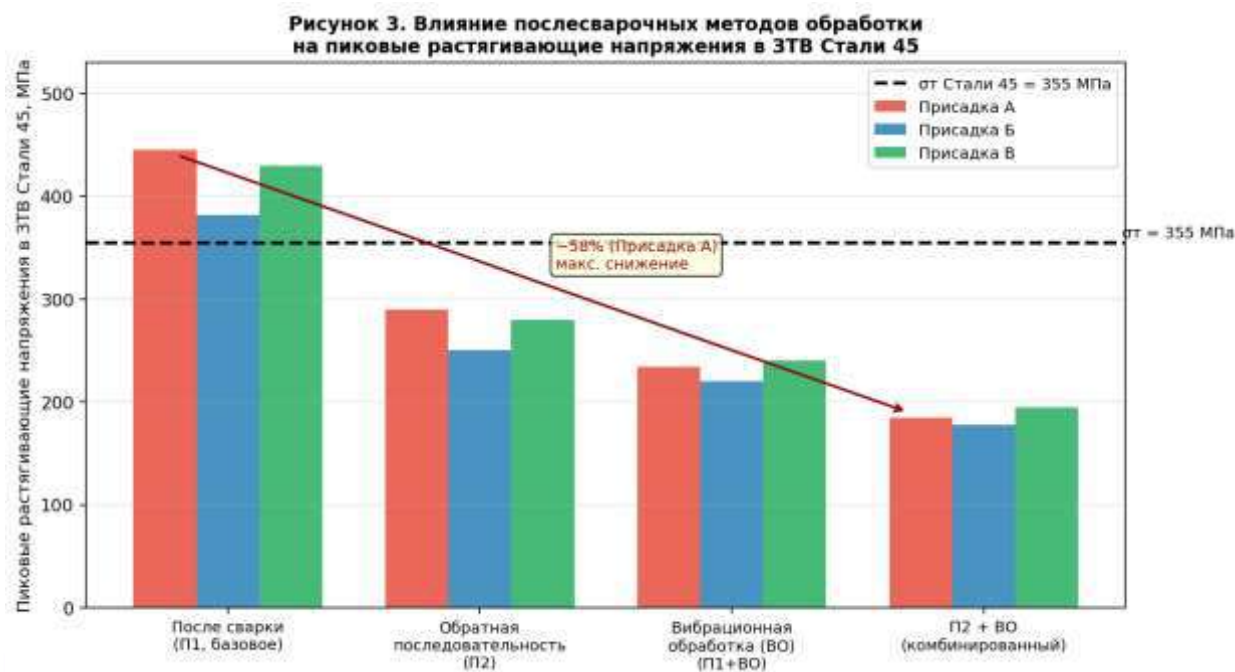


Рисунок 3. Влияние послесварочных методов обработки на пиковые растягивающие напряжения в ЗТВ стали 45 (линия $\sigma_t = 355$ МПа показывает предел текучести стали 45)

3.5. Влияние остаточных напряжений на обрабатываемость резанием

Испытания точением ($V_c = 80$ м/мин; $f = 0,2$ мм/об; $a_p = 1,0$ мм; твердосплавная пластина TNMG120408) показали, что образцы в состоянии «после сварки» (П1, присадка А) демонстрировали флуктуации силы резания $\pm 28\%$ относительно незасваренной стали 45. После обработки по схеме П2 + ВО флуктуации силы резания снизились до $\pm 9\%$, разброс размеров обработанных поверхностей уменьшился с 0,18 мм до 0,06 мм, а износ инструмента за 20 минут резания сократился на 22%.

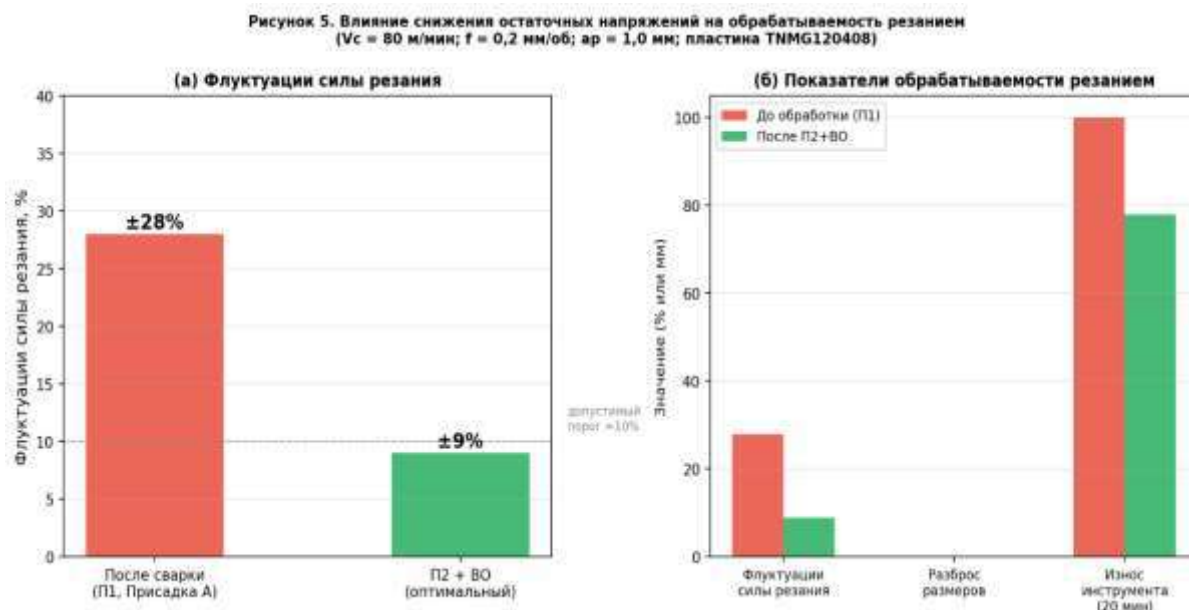


Рисунок 5. Влияние снижения остаточных напряжений на показатели обрабатываемости резанием ($V_c = 80$ м/мин; $f = 0,2$ мм/об; $a_p = 1,0$ мм; пластина TNMG120408)

4. Обсуждение результатов

Наблюдаемая асимметрия остаточных напряжений — более высокие растягивающие напряжения на стороне стали 45 — согласуется с теоретическим прогнозом, основанным на несоответствии коэффициентов линейного термического расширения. Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т имеет $K_{ТР} = 16,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ против $11,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у стали 45, то есть сжимается при охлаждении сильнее. Однако более высокий предел текучести нержавеющей стали ограничивает накопление пластических деформаций в высокотемпературной фазе. Вследствие этого при охлаждении более слабая при высоких температурах сталь 45 накапливает необратимые пластические сжимающие деформации, которые после охлаждения преобразуются в растягивающие остаточные напряжения [8].

Применение более пластичной никелевой присадки ЭНиХ-1 (вариант Б) снизило пиковые напряжения: более пластичный металл шва функционирует как демпфирующий слой, перераспределяющий пластическую деформацию равномернее по объёму соединения. Аналогичная роль промежуточного слоя

описана для сварки трением с перемешиванием соединений алюминий–сталь [9], где оптимизированный промежуточный слой снижал пиковые напряжения на 28–33%.

Эффективность знакопеременной последовательности наложения швов (П2) объясняется принципом термической симметризации: чередование направления каждого прохода уменьшает результирующий продольный температурный градиент, накопленный за полный цикл сварки. Незначительное завышение расчётного снижения по сравнению с экспериментальным (38–42% против 35–38%) обусловлено упрощённой моделью кинематического упрочнения, не учитывающей в полной мере эффект Баушингера при циклических термических нагрузках.

Вибрационная обработка реализует принципиально иной механизм снижения напряжений: динамическое нагружение вблизи резонансной частоты конструкции вызывает локальную микропластическую деформацию в зонах концентрации напряжений, где напряжения максимально приближены к пределу текучести. Локальная пластическая деформация снижает упругую деформацию несоответствия, являющуюся причиной остаточного напряжения. Данный механизм подтверждается наблюдением, что ВО наиболее эффективна именно в ЗТВ стали 45, где напряжения наиболее близки к $\sigma_T = 355$ МПа [10].

Улучшение обрабатываемости резанием после снижения остаточных напряжений является прямым следствием уменьшения вариации жёсткости заготовки. Высокие растягивающие остаточные напряжения вызывают локальные изменения кажущейся жёсткости (через эффект предварительного напряжения), что проявляется как флуктуации сил резания при прохождении инструмента через зону высоких напряжений. Снижение пиковых напряжений на 55–58% (П2 + ВО) соответственно уменьшает вариацию жёсткости.

Важным практическим аспектом является доступность предложенной технологии. Комбинированная обработка П2 + ВО значительно более

привлекательна, чем послесварочная термическая обработка (ПСТО): для соединений сталь 45 / 12X18H10T применение ПСТО сопряжено с риском sensibilization нержавеющей стали и требует крупногабаритных нагревательных печей. ВО реализуется непосредственно на рабочем месте с использованием компактного оборудования без существенного нагрева детали.

5. Заключение

В настоящей работе исследованы механизмы формирования, методы измерения и способы регулирования остаточных напряжений в разнородных сварных соединениях сталь 45 / 12X18H10T, применяемых в машиностроении. Основные выводы:

1. Несоответствие теплофизических свойств материалов, прежде всего разница КТР ($\Delta\alpha \approx 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), формирует выраженную асимметрию остаточных напряжений: пиковые растягивающие напряжения в ЗТВ стали 45 (380–450 МПа) превышают соответствующие значения на стороне нержавеющей стали на 55–65%, приближаясь к пределу текучести стали 45.

2. Присадочный материал на никелевой основе ЭНХ-1 обеспечивает минимальные пиковые растягивающие напряжения (382 МПа) и наиболее плавный градиент напряжений в ЗТВ, что делает его предпочтительным для разнородных соединений с высокими требованиями к усталостной прочности.

3. Разработанная МКЭ-модель с совместным термомеханическим анализом достоверно прогнозирует распределение остаточных напряжений (максимальное отклонение от данных РСА — 8–11%), что подтверждает её применимость в качестве инструмента проектирования технологических процессов.

4. Знакопередающая последовательность наложения швов (П2) снижает пиковые напряжения в ЗТВ стали 45 на 35–38%; послесварочная вибрационная обработка — на 41–48%; комбинированная обработка П2 + ВО обеспечивает

снижение на 55–58% — наиболее высокую эффективность среди исследованных методов.

5. Снижение остаточных напряжений при обработке по схеме П2 + ВО улучшает обрабатываемость резанием зоны шва: флуктуации силы резания уменьшаются с $\pm 28\%$ до $\pm 9\%$, разброс размеров снижается втрое, износ инструмента за 20 минут резания сокращается на 22%.

Список литературы

- [1] Биметаллические и разнородные сварные соединения / Под ред. Р. Качара. InTech Open, 2018. 240 с. DOI: 10.5772/intechopen.71291
- [2] Xu J., Gilles P., Duan Y., Yu C. Temperature and residual stress simulations of the NeT single-bead-on-plate specimen using SYSWELD // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012. Vol. 99–100. P. 51–60. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2012.08.009
- [3] Benyounis K.Y., Olabi A.G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches // Advances in Engineering Software. 2008. Vol. 39. P. 483–496. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2007.03.012
- [4] Jiang W., Woo W., Wan Y. et al. Evaluation of through-thickness residual stresses by neutron diffraction and finite-element method in thick weld plates // Journal of Pressure Vessel Technology. 2017. Vol. 139. DOI: 10.1115/1.4035568
- [5] Kartal M.E., Kang Y.-H., Korsunsky A.M. et al. The effect of welding procedure and plate geometry on residual stresses in thick plates // Mechanics of Materials. 2016. Vol. 92. P. 1–9.
- [6] Mochizuki M. et al. Residual stress analysis by FEM for multi-pass welded joint in piping system // JSME International Journal, Series A. 2000. Vol. 43. P. 356–363.
- [7] Zhang J., Dong P. Residual stresses in welded moment frames and connections // Journal of Structural Engineering. 2000. Vol. 126. P. 306–315.
- [8] Payares-Asprino M.C. et al. Effect of preheat and interpass temperature on residual stress development in structural steel welds // Materials and Design. 2008. Vol. 29. P. 1568–1580.
- [9] Farsakh G.A., Bataeneh L.K., Qudaisat M.A. Residual stresses in dissimilar aluminum-steel friction stir welds // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 114. P. 1505–1516.

[10] Qian L., He J., Zhang Y. et al. Vibration stress relief of a welded rotor // CIRP Annals. 2013. Vol. 62. P. 527–530.

[11] ГОСТ Р ИСО 12004-2–2012. Метод определения остаточных напряжений методом сверления отверстия. — М.: Стандартинформ, 2012.

[12] EN 15305:2008. Неразрушающий контроль. Метод испытания для анализа остаточных напряжений рентгеновской дифракцией. — Брюссель: CEN, 2008.

