

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.787.6.004

doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-4-15

КОМБИНИРОВАННОЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛНОВОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ

Максим Евгеньевич Жидков¹, Валерий Александрович Лебедев², Андрей Викторович Киричек³, Сергей Владимирович Баринов^{4✉}

¹ Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгоград, Россия

² Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

³ Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

⁴ Владимирский государственный университет, Владимир, Россия

¹ zhidkov_me@atommash.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5563-8242>

² va.lebidev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7305-6046>

³ avk.57@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

⁴ box64@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1341-446X>

Аннотация

Целью исследования является разработка и верификация комбинированной конечно-элементной модели для оценки влияния волнового деформационного упрочнения (ВДУ) на напряженно-деформированное состояние и твердость сварных швов. Задача, решению которой посвящена статья является создание в среде *ANSYS* комбинированной модели, учитывающей этапы формирования сварного соединения и последующего динамического воздействия инструментом, а также разработка методики пересчета результатов моделирования в значения твердости. Моделирование выполнено методом конечных элементов в *ANSYS Workbench* с использованием модулей *Transient Thermal*, *Static Structural* и *Transient Structural*. Экспериментальная верификация проводилась на образцах из стали 15Х2НМФА со сварным швом из проволоки св-09ХГНМГАА-ВИ при энергиях удара 150 Дж, коэффициентах перекрытия $K=0,2; 0,4; 0,6$ и температурах 20 °С и 200 °С. Научная новизна заключается в разработке комбинированной конечно-элементной модели, впервые позволяющей в едином цикле прогнозировать формирование остаточных напряжений при сварке и их изменение под

действием ВДУ, а также в установлении эмпирических зависимостей для пересчета пластических деформаций в твердость с учетом коэффициента перекрытия и температуры. Верификация модели показала высокую сходимость с экспериментом - погрешность определения размеров отпечатка составила менее 3 %, средняя погрешность прогнозирования твердости не более 4,5 %. Установлено, что оптимальным режимом ВДУ является обработка с $K=0,6$ при 200 °С, обеспечивающая существенное повышение сжимающих остаточных напряжений в шве и зоне термического влияния, а также увеличение поверхностной твердости до 259 НВ, что на 12,5 % выше исходного значения (228 НВ). Разработанная модель адекватно описывает процесс ВДУ и может быть использована для оптимизации технологических режимов упрочнения сварных соединений ответственных конструкций транспортного машиностроения.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, *ANSYS*, сварной шов, упрочнение, напряжение, твердость, верификация, машиностроение.

Ссылка для цитирования:

Жидков М.Е. Комбинированное конечно-элементное моделирование процесса волнового деформационного упрочнения сварных швов / М.Е. Жидков, В.А. Лебедев, А.В. Киричек, С.В. Баринов // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 4. – С. 4-15. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-4-15.

Original article

Open Access Article

COMBINED FINITE ELEMENT MODELING OF WAVE DEFORMATION HARDENING OF WELDS

Maksim Evgenievich Zhidkov¹, Valery Aleksandrovich Lebedev², Andrey Viktorovich Kirichek³, Sergey Vladimirovich Barinov⁴✉

¹ Branch of AEM-Technologies of Atommash, Volgodonsk, Rostov region, Russia

² Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia

³ Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

⁴ Vladimir State University, Vladimir, Russia

¹ zhidkov_me@atommash.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5563-8242>

² va.lebedev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7305-6046>

³ avk.57@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

⁴ box64@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1341-446X>

Abstract

The study objective is to develop and verify a combined finite element model for evaluating the effect of wave deformation hardening (WDH) on the stress-strain state and hardness of welds. The task to which the paper is devoted is to make a combined ANSYS model that takes into account the stages of forming a welded joint and the subsequent dynamic impact of the tool, as well as the development of a method to convert modeling results into hardness values. The simulation is performed using the finite element method in ANSYS Workbench using Transient Thermal, Static Structural and Transient Structural modules. Experimental verification is carried out on samples made of 15X2NMFA steel with a weld made of sv-09KHGNMTA-VI wire at impact energies of 150 J, overlap coefficients $K = 0.2; 0.4; 0.6$ and temperatures of 20 °C and 200 °C. The scientific novelty is the development of a combined finite element model, which for makes it possible the first time in a single cycle to predict the formation of residual stresses during weld-

ing and their change under WDH action, as well as to find out empirical dependencies for converting plastic deformations into hardness, taking into account the overlap and temperature factors. The verification of the model showed high convergence with the experiment - the error in determining the size of the print is less than 3 %, the average error in predicting hardness is no more than 4.5 %. It is found out that the optimal WDH mode is treatment with $K = 0.6$ at 200 °C, which provides a significant increase in compressive residual stresses in the weld and the zone of thermal influence, as well as an increase in surface hardness to 259 HB, which is 12.5% higher than the initial value (228 HB). The developed model adequately describes WDH process and can be used to optimize the technological modes of hardening welded joints of critical structures of transport engineering.

Keywords: finite element modeling, ANSYS, weld, hardening, stress, hardness, verification, transport engineering.

Reference for citing:

Zhidkov ME, Lebedev VA, Kirichek AV, Barinov SV. Combined finite element modeling of wave deformation hardening of welds. *Transport Engineering*. 2026;4: 4-15. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-4-15.

Сварные соединения являются неотъемлемым элементом современных металлоконструкций в транспортном машиностроении от корпусов реакторов и элементов трубопроводов до рам подвижного состава и кузовов автомобилей [1]. В процессе сварки в зоне соединения формируются остаточные сварочные напряжения и деформации, которые в сочетании с эксплуатационными нагрузками могут приводить к снижению усталостной долговечности и преждевременному разрушению ответственных узлов. Одним из эффективных методов повышения ресурса сварных соединений является волновое деформационное упрочнение (ВДУ), позволяющее создавать в поверхностном слое сжимаю-

щие остаточные напряжения и формировать упрочненный слой глубиной до 15 мм [2, 3]. Однако для широкого внедрения этой технологии в производство требуется разработка надежных методов прогнозирования результатов обработки, учитывающих предысторию нагружения материала.

Анализ современного состояния проблемы моделирования сварных швов и их последующей обработки показывает, что существующие подходы, как правило, фрагментарны. В работах [4, 5] подробно рассматриваются термомеханические процессы при сварке и формирование остаточных напряжений с использованием метода конечных элементов в среде ANSYS.

Другие исследования [6–8] посвящены моделированию процессов поверхностного пластического деформирования (ППД) и демонстрируют высокую сходимость с экспериментом (погрешность до 5 %). Однако в большинстве случаев сварной шов моделируется либо как неотъемлемая часть конструкции с идеализированными свойствами [9, 10], либо процесс упрочнения рассматривается изолированно [11], без учета исходного напряженно-деформированного состояния (НДС), сформировавшегося после сварки. Существующие аналитические модели ВДУ [12, 13] обладают рядом ограничений, таких как учет полупространства вместо реальных размеров детали и невозможность прогнозирования распределения свойств по глубине упрочненного слоя.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка и верификация

Материалы, модели, эксперименты и методы

Объект исследования и материалы. Объектом исследования являлись стыковые сварные соединения, выполненные из стали 15Х2НМФА (основной металл) с разделкой кромок под углом 45°. Сварка производилась в два прохода проволокой св-09ХГНМТАА-ВИ, формирующей металл шва. Геометрические размеры образцов составляли 75×40×14 мм. После сварки образцы подвергались волновому деформационному упрочнению при двух температурах: +20 °С и +200 °С. Для каждой температуры реализованы три значения коэффициента перекрытия отпечатков $K = 0,2; 0,4; 0,6$. Упрочнение выполнялось стержневым роликом диаметром 10 мм и шириной 40 мм с энергией единичного удара 150 Дж и частотой 10 Гц.

Методология конечно-элементного моделирования. Моделирование реализовано в среде ANSYS Workbench как комбинированная задача, включающая три последовательных этапа для учета полного технологического цикла [14, 15].

На первом этапе в модуле *Transient Thermal* моделировался процесс сварки. Геометрия образца создавалась с разделением объема сварного шва на элементы, соответствующие лицевому и корневому

комбинированной конечно-элементной модели в среде ANSYS, позволяющей в едином цикле последовательно моделировать процессы формирования сварного соединения (тепловые процессы, остаточные напряжения) и его последующего волнового деформационного упрочнения. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: создание геометрической и конечно-элементной модели сварного шва с учетом многопроходной сварки; моделирование процесса ВДУ с варьированием коэффициента перекрытия ударов ($K = 0,2; 0,4; 0,6$) и температуры обработки (20 °С и 200 °С); разработка методики пересчета полей пластических деформаций в значения твердости; экспериментальная верификация разработанной модели по параметрам ударного импульса, геометрии отпечатков и распределению твердости.

проходам (согласно ГОСТ 5264-80). Теплофизические свойства материалов (теплопроводность, удельная теплоемкость и др.) задавались с учетом их температурной зависимости. Нагрев моделировался путем приложения теплового потока к элементам шва, величина которого определялась по режимам сварки (сила тока, напряжение, скорость). На все наружные поверхности задавалось граничное условие конвективного теплообмена с окружающей средой. Результатом расчета являлись распределения температурных полей в каждый момент времени.

Второй этап выполнялся в модуле *Static Structural*, куда импортировались температурные поля из теплового расчета. Здесь решалась термомеханическая задача, в которой температурные поля выступали нагрузкой, вызывающей тепловое расширение материала. Механические свойства (модуль упругости, предел текучести, касательный модуль, коэффициент температурного расширения и др.). Граничные условия включали закрепление торцов образца (*Fixed Support*) и ограничение перемещений по нормали к нижней поверхности (*Frictionless Support*) для исключения жестких смещений. На выходе модуля

формировалось напряженно-деформированное состояние сварного соединения с полями остаточных напряжений.

Третий этап, моделирование процесса ВДУ, проводился в модуле *Transient Structural* с использованием явного решателя. В модель импортировалась геометрия образца с учетом деформаций после сварки (через *Mechanical Model*) и поля остаточных напряжений (*Imported Initial Stress*). Добавлялась геометрия инструмента (ролик). Контактное взаимодействие в паре «инструмент–заготовка» задавалось типом *Frictional* с указанием коэффициента трения. Граничные условия включали закрепление торцов образца и задание скорости перемещения заготовки для имитации подачи, обеспечивающей требуемый коэффициент перекрытия K . Нагрузка на инструмент задавалась в виде зависимости силы от времени (ударный импульс). Форма импульса (амплитуда, длительность головной и хвостовой частей) предварительно определялась в отдельном конечно-элементном расчете ударной системы «боек–волновод–образец» в модуле *LS-DYNA* для соответствующих температур обработки. В настройках анализа активирована-

$$HV_{20} = 228 + 50,6(\varepsilon_{pl})^{0,35}(1 + 0,93K) \quad (\text{для } T = 20^\circ\text{C}), \quad (1)$$

$$HV_{200} = 228 + 55(\varepsilon_{pl})^{0,35}(1 + 0,93K) \quad (\text{для } T = 200^\circ\text{C}), \quad (2)$$

где ε_{pl} – эквивалентная пластическая деформация из моделирования (мм/мм); K – коэффициент перекрытия отпечатков.

Экспериментальная методика. Для верификации модели изготавливались образцы по описанной выше технологии. Волновое деформационное упрочнение проводилось на специализированном стенде с ударной системой, имеющей отношение длины бойка к длине волновода 3:1. После обработки для каждого режима ($K = 0,2; 0,4; 0,6$ при $T = 20^\circ\text{C}$ и 200°C) выполнялись:

лось автоматическое определение шага по времени для корректного отслеживания высокоскоростных процессов контакта и пластического деформирования. Для сокращения вычислительных затрат задача решалась в симметричной постановке (объем данных на один вариант расчета составлял ~ 45 Гб).

Методика пересчета пластических деформаций в твердость. Поскольку в *ANSYS* отсутствует прямая функция расчета твердости, для перехода от полей напряженно-деформированного состояния к значениям твердости использована косвенная методика. На основе результатов моделирования для каждого режима обработки определялось распределение эквивалентной пластической деформации (*Equivalent Plastic Strain (PEEQ)*) по глубине образца. С использованием экспериментально полученных кривых деформационного упрочнения материала и данных прямых измерений твердости методом регрессионного анализа установлены эмпирические зависимости, связывающие *PEEQ*, коэффициент перекрытия K и температуру обработки с твердостью по шкале HV:

– измерение ширины единичных пластических отпечатков с помощью оптического микроскопа (точность 0,01 мм);

– измерение твердости по Бринелю (HV) на микрошлифах, изготовленных из образцов после серии ударов, с шагом 0,3 мм по глубине от упрочненной поверхности.

Полученные экспериментальные данные использовались для оценки адекватности разработанной конечно-элементной модели и калибровки эмпирических зависимостей для пересчета деформаций в твердость.

Результаты. Верификация модели по параметрам ударного импульса

Для корректного задания силового воздействия при моделировании ВДУ определены параметры единичного ударного импульса путем расчета ударной системы «боек–волновод–образец» в модуле

LS-DYNA. Полученная форма импульса (рис. 1) содержит головную и хвостовую части, обусловленную многократными отражениями волн в ударной системе.

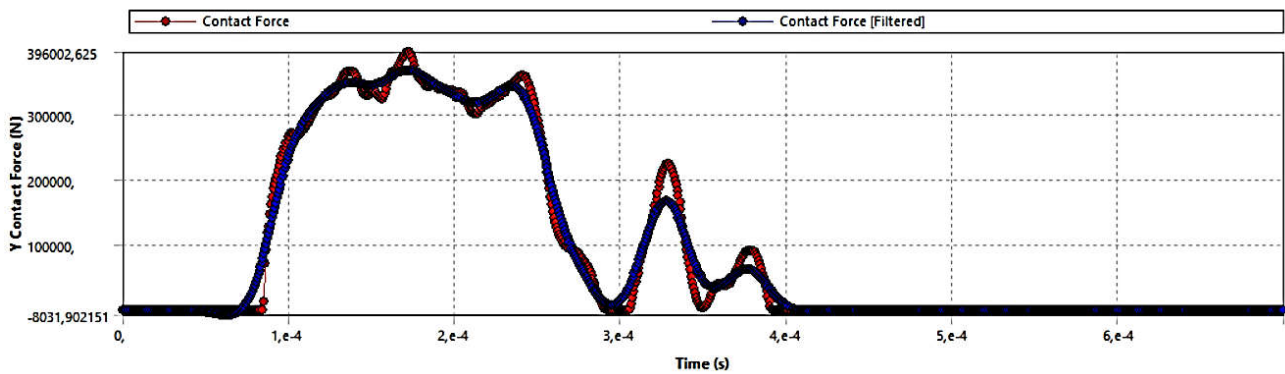


Рис. 1. Форма ударного импульса на контакте «волновод–образец» при температуре 20 °С (результат моделирования в *LS-DYNA*): показаны головная и хвостовая части импульса, формирующиеся за счет отражения волн деформации от границ раздела элементов ударной системы.

Для устранения высокочастотного численного шума и приближения к экспериментальной регистрируемой кривой применён фильтр нижних частот (синяя линия) (*Butterworth*, 10 кГц)

Fig. 1. Impact pulse shape at the "waveguide-specimen" contact at a temperature of 20°C (*LS-DYNA* simulation result): the head and tail parts of the pulse formed by reflection of deformation waves at the interfaces of the impact system elements are shown. To eliminate high-frequency numerical noise and approximate the experimental recorded curve, a low-pass filter (*Butterworth*, 10 kHz) was applied (blue line)

Поскольку прямое экспериментальное измерение параметров ударного импульса с высоким временным разрешением сопряжено со значительными методическими трудностями, в качестве косвенного критерия адекватности использовано сравнение полученных характеристик с расчетными значениями по общепринятым аналитическим зависимостям. Длительность ударного импульса оценивалась по формуле, основанной на длине бойка и скорости звука в материале [2]:

$$T = 2L_1/a_1, \quad (3)$$

где L_1 – длина бойка, a_1 – скорость распространения упругой волны в материале бойка. Амплитуда силы удара (максимальное значение) определялась из выражения, учитывающего акустические жесткости бойка и волновода, массу бойка и энергию удара:

$$P_{уд} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \sqrt{\frac{2A}{m_1}}, \quad (4)$$

где C_1 , C_2 – акустические жесткости бойка и волновода, A – энергия удара, m_1 – масса бойка.

Данные зависимости не учитывают влияния обрабатываемого материала и волновых процессов в образце, однако их применение позволяет получить опорные значения для оценки правдоподобия результатов моделирования.

Сравнение результатов моделирования с аналитическими зависимостями (3, 4) представлено в табл. 1 и 2.

Анализ показал, что расхождение по амплитуде силы удара составляет 6,2 %, по длительности головной части импульса 15,1–15,9 %. Значительное расхождение по полной длительности (41,8–42,3 %) объясняется вкладом волновода и образца, не учитываемым аналитической моделью.

Таблица 1

Сравнение длительности ударного импульса

Table 1

Comparison of shock pulse duration

| L_1/L_2 | $t, ^\circ\text{C}$ | T, сек (расчет) | T, сек (модель: головная + хвостовая части) | T, % (погреш) (модель: головная + хвостовая части) | T, сек (модель: головная) | T, % (погреш) (модель: головная) |
|-----------|---------------------|-----------------|---|--|---------------------------|----------------------------------|
| 3 | 20 | 0,000185 | 0,000318 | 41,8 | 0,000218 | 15,1 |
| | 200 | | 0,000321 | 42,3 | 0,00022 | 15,9 |

Сравнение амплитуды силы удара

Table 2

Comparison of the impact force amplitude

| L_1/L_2 | $t, ^\circ\text{C}$ | Руд, кН (расчет) | Руд, кН (модель) | Руд, % (погреш) |
|-----------|---------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 3 | 20 | 344 | 367 | 6,2 |
| | 200 | | 367 | 6,2 |

Верификация по геометрическим размерам единичного отпечатка

Сопоставление ширины единичных пластических отпечатков, полученных в результате моделирования и натурального эксперимента, приведено в табл. 3.

Расхождение между модельными и экспериментальными значениями не превышает 2,91%, что подтверждает адекватность моделирования контактного взаимодействия.

Таблица 3

Сравнение ширины единичного отпечатка

Table 3

Comparing the width of a single print

| Температура упрочняемого материала, $^\circ\text{C}$ | Размер отпечатка, мм | | Погрешность, % |
|--|----------------------|-------------|----------------|
| | Модель | Эксперимент | |
| +20 | 2,235 | 2,3 | 2,91 |
| +200 | 2,41 | 2,4 | 0,41 |

Верификация по распределению твердости после серии ударов

На рис. 2 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных распределений твердости по глубине упрочненного слоя для различных коэффициентов перекрытия K при температуре 20°C .

Экспериментальные точки аппроксимированы степенными зависимостями для сглаживания разброса, обусловленного структурной неоднородностью сварного шва.

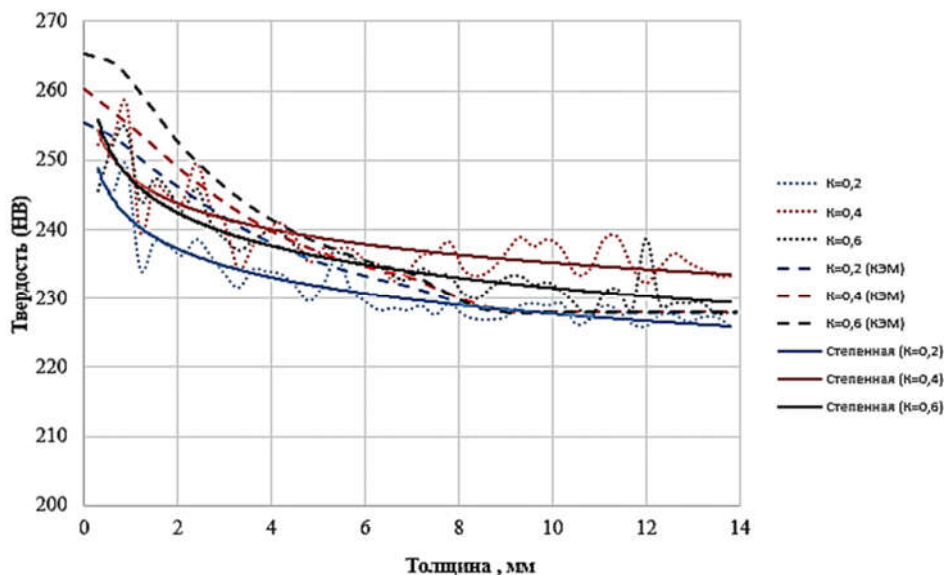


Рис. 2. Распределение твердости по толщине сварного шва после ВДУ ($T=20^\circ\text{C}$): точки – эксперимент; сплошные линии – аппроксимированные степенными зависимостями экспериментальные точки; пунктирные линии – расчет по модели

Fig. 2. Hardness distribution across the weld seam thickness after WSH ($T=20^\circ\text{C}$): dots — experiment; solid lines - are experimental points approximated by power-law dependences; lines — model calculation

Количественная оценка точности модели выполнена путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений твердости на всех глубинах измерения. Для режима $K = 0,2$ среднее отклонение по всей глубине составило 3,8 %, максимальное локальное отклонение (на глубине 0,3 мм) – 8,2 %. При $K = 0,4$ средняя погрешность равна 4,1 %, максимальная (на глуп-

бине 0,3 мм) – 9,5 %. Для $K = 0,6$ средняя погрешность составляет 4,5 %, максимальная (на глубине 0,6 мм) – 10,3 %. Полученные значения погрешности являются приемлемыми для инженерных расчетов процессов поверхностного пластического деформирования и подтверждают адекватность разработанной модели.

Влияние режимов ВДУ на остаточные напряжения

На рис. 3 и 4 представлены распределения нормальных остаточных напряжений по глубине для сварного шва и зоны

термического влияния (ЗТВ) при различных температурах и коэффициентах перекрытия.

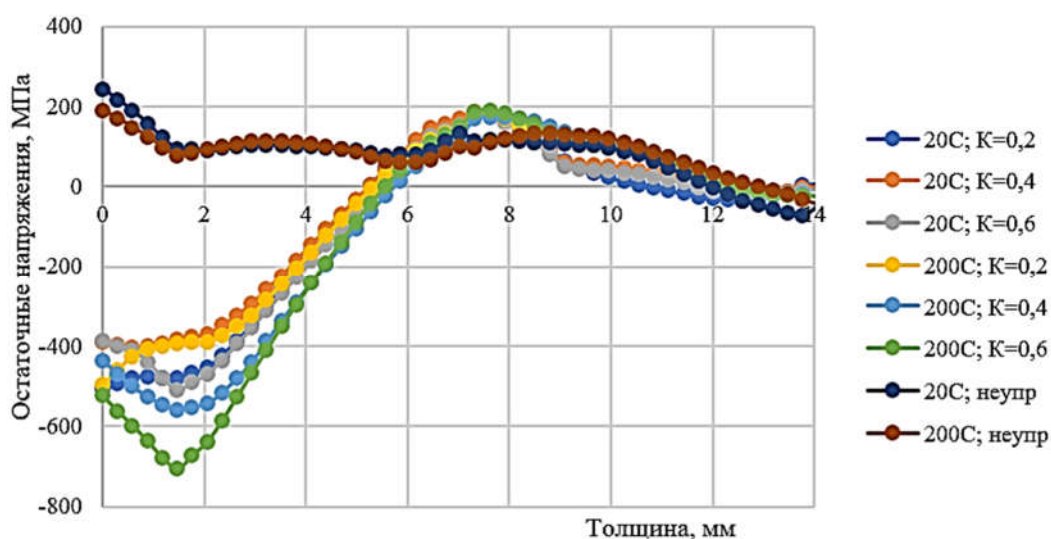


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по толщине сварного шва
 Fig. 3. Distribution of residual stresses across the thickness of the weld

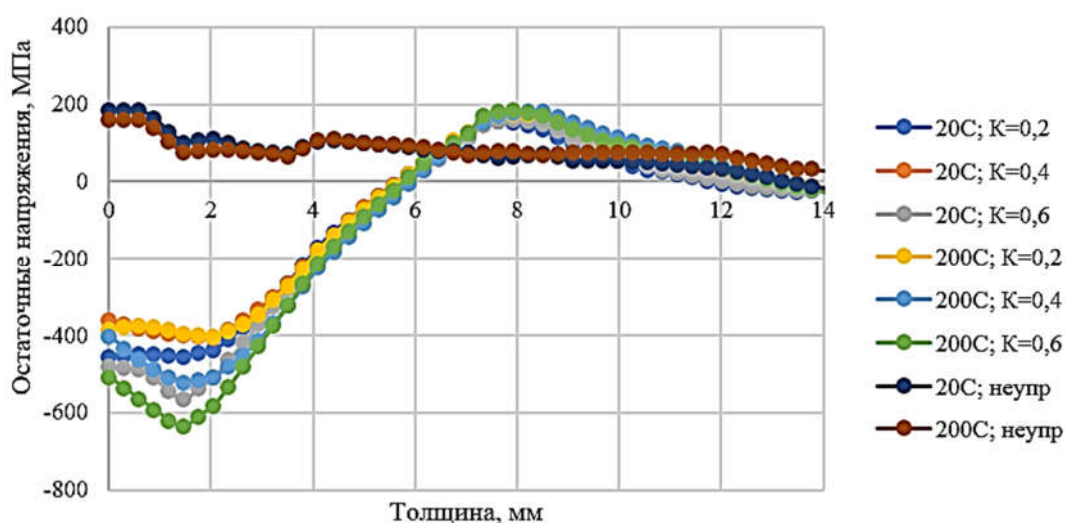


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений по толщине сварного шва
 Fig. 4. Distribution of residual stresses across the thickness of the weld

Установлено, что максимальные сжимающие напряжения в сварном шве при 20 °С достигаются при $K = 0,6$ (–524 МПа) на поверхности, минимальные — при $K = 0,4$ (–404 МПа). Повышение температуры до 200 °С приводит к существенному росту сжимающих напряжений при $K = 0,6$ (до –705 МПа) и $K = 0,4$

(до –559 МПа), при этом максимум напряжений смещается на глубину 1,5 мм. В ЗТВ наблюдается аналогичная тенденция: максимальные сжимающие напряжения зафиксированы при $K = 0,6$ и $T = 200$ °С (–637 МПа). Глубина нулевого перехода напряжений для всех режимов составляет 5–6 мм.

Влияние режимов ВДУ на твердость

На рис. 5 и 6 представлены распределения твердости по глубине, полученные путем пересчета пластических деформаций по (3, 4).

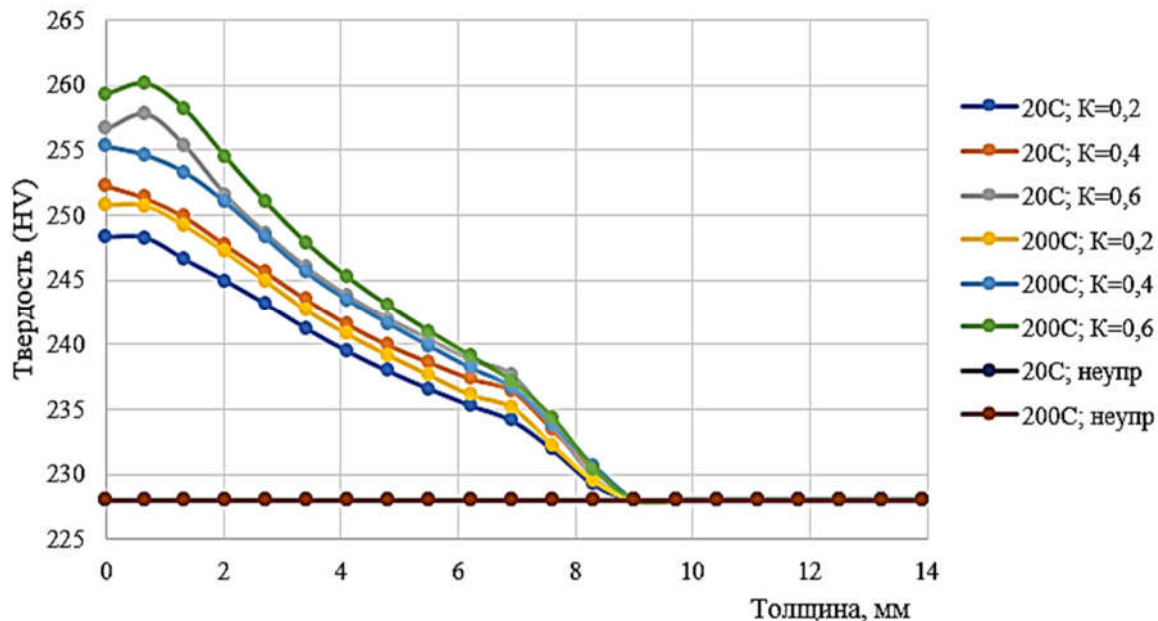


Рис. 5. Распределение твердости по толщине сварного шва
Fig. 5. Hardness distribution across the weld seam thickness

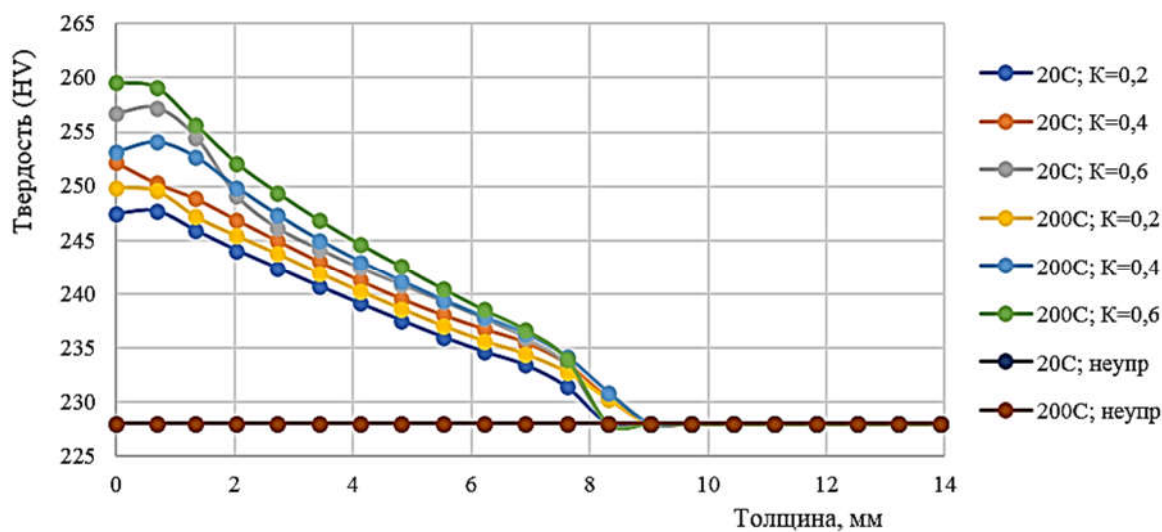


Рис. 6. Распределение твердости по толщине зоны термического влияния
Fig. 6. Hardness distribution across the thickness of the heat-affected zone

Поверхностная твердость сварного шва при 20 °С возрастает с увеличением K : 248 НВ ($K = 0,2$) до 252 НВ ($K = 0,4$), до 257 НВ ($K = 0,6$). Нагрев до 200 °С обеспечивает дополнительный прирост твердости на поверхности: до 251 НВ, 256 НВ и

Обсуждение

Полученные результаты позволяют выявить ряд закономерностей, характеризующих влияние параметров волнового деформационного упрочнения на состояние сварного соединения.

Адекватность разработанной модели. Верификация по трем независимым критериям подтвердила, что комбинированная конечно-элементная модель корректно отражает физику процесса. Расхождение по амплитуде силы удара (6,2 %) и длительности головной части импульса (15,1–15,9 %) (табл. 1, 2) обусловлено, главным образом, упрощениями аналитических зависимостей, не учитывающих влияния волновода и образца. Модель же, напротив, достоверно воспроизводит формирование протяженной хвостовой части импульса (рис. 1), что принципиально важно для адекватного описания процесса ВДУ. Высокая сходимость по ширине единичного отпечатка (погрешность менее 3%, табл. 3) свидетельствует о точности моделирования контактного взаимодействия инструмента с материалом. Наиболее значимым результатом верификации является сопоставление расчетных и экспериментальных распределений твердости (рис. 2). Средняя погрешность прогноза 3,8–4,5 % (табл. 4) при максимальных локальных отклонениях до 10,3 % в приповерхностной зоне является вполне приемлемой для инженерных задач подобного класса. Наибольшие расхождения в зоне 0–1,5 мм объясняются высокими градиентами деформаций, структурной неоднородностью сварного шва и статистическим разбросом экспериментальных измерений твердости.

Влияние режимов на остаточные напряжения. Выявлен характер влияния коэффициента перекрытия K на уровень сжимающих остаточных напряжений (рис. 3, 4). При температуре 20 °С режим $K = 0,4$

260 НВ соответственно для $K = 0,2$; 0,4; 0,6. Глубина упрочненного слоя для всех режимов составляет 8–9 мм. Распределения твердости в ЗТВ количественно близки к значениям в сварном шве.

дает наименьший эффект (–404 МПа в шве), тогда как $K = 0,6$ – наибольший (–524 МПа). Это может быть связано с тем, что при $K = 0,4$ зоны пластической деформации от последовательных ударов частично накладываются друг на друга, создавая сложную интерференционную картину волн напряжений, не оптимальную для формирования глубокого сжатия. Повышение температуры до 200 °С существенно трансформирует картину, при $K = 0,4$ и $K = 0,6$ сжимающие напряжения возрастают до –559 МПа и –705 МПа соответственно, причем их максимум смещается с поверхности на глубину около 1,5 мм. Такой эффект объясняется увеличением пластичности материала при нагреве, что способствует более эффективной передаче ударного импульса вглубь и формированию благоприятной эпюры остаточных напряжений. Важно отметить, что глубина залегания сжимающих напряжений (5–6 мм) остается стабильной для всех режимов, что согласуется с данными по распределению пластических деформаций.

Влияние режимов на твердость. Закономерное увеличение твердости с ростом K (рис. 5, 6) обусловлено накоплением пластической деформации в поверхностном слое при многократном перекрытии отпечатков. При $K = 0,6$ каждый элементарный объем материала испытывает до 2–3 дополнительных циклов нагружения по сравнению с $K = 0,2$, что интенсифицирует деформационное упрочнение. Дополнительный нагрев до 200 °С, повышая пластичность материала, способствует более полному протеканию процессов пластического течения и, как следствие, дополнительному приросту твердости. Практически важным результатом является то, что глубина упрочненного слоя (8–9 мм) слабо зависит от температуры и K , достигая значений, характерных для технологии

ВДУ. Сравнение сварного шва и зоны термического влияния показало, что их упрочнение при ВДУ практически одинаково (рис. 5, 6). Это свидетельствует о том,

Заключение

Разработана комбинированная конечно-элементная модель в среде *ANSYS*, позволяющая в едином цикле последовательно моделировать формирование сварного соединения (тепловые процессы и остаточные напряжения) и его последующее волновое деформационное упрочнение. Модель учитывает многопроходную сварку, температурную зависимость свойств материалов, динамический характер нагружения и контактное взаимодействие инструмента с заготовкой.

Предложена и экспериментально обоснована методика пересчета полей эквивалентной пластической деформации в значения твердости по шкале НВ с использованием эмпирических зависимостей, учитывающих коэффициент перекрытия K и температуру обработки. Полученные формулы (3, 4) обеспечивают среднюю погрешность прогноза не более 4,5 %.

Верификация модели по трем независимым критериям подтвердила ее адекватность:

- расхождение по амплитуде ударного импульса 6,2 %;
- погрешность определения ширины единичного отпечатка менее 3 %;
- средняя погрешность распределения твердости 3,8–4,5 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перспективы применения волнового деформационного упрочнения сварных швов корпусов ядерных реакторов / М.Е. Жидков, А.В. Киричек, В.А. Лебедев [и др.] // Транспортное машиностроение, 2024, № 11, С. 24-30. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-11-24-30.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
3. Повышение контактной выносливости гетерогенным волновым деформационным упрочнением / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, Д.Е. Тарасов // Справочник по процессам

что исходные структурные различия металла шва и ЗТВ, сформировавшиеся при сварке, нивелируются в процессе интенсивной пластической деформации.

Установлены закономерности влияния технологических параметров ВДУ:

- оптимальным режимом, обеспечивающим максимальные сжимающие остаточные напряжения, является обработка с коэффициентом перекрытия $K = 0,6$ при температуре 200 °С. В этом случае напряжения в сварном шве достигают –705 МПа, в зоне термического влияния –637 МПа, а максимум напряжений смещается на глубину 1,5 мм;

- повышение температуры до 200 °С обеспечивает дополнительный прирост поверхностной твердости для всех значений K ;

- глубина упрочненного слоя (8–9 мм) и глубина залегания сжимающих напряжений (5–6 мм) стабильны для исследованного диапазона режимов.

Показано, что сварной шов и зона термического влияния упрочняются практически одинаково, что свидетельствует о нивелировании исходной структурной неоднородности в процессе ВДУ.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических режимов волнового деформационного упрочнения сварных соединений ответственных конструкций транспортного машиностроения с целью повышения их усталостной долговечности и ресурса.

поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2022. С. 438-460.

4. Буклешев Д.О., Яговкин Н.Г. Математическое моделирование образования напряжений в околошовных зонах газопроводов и их поведения при нагрузках при помощи программного продукта *ANSYS* // Территория «НЕФТЕГАЗ», 2016, № 10, С. 88–92.
5. Биленко Г.А., Моргунов Е.А., Коробов Ю.С. Компьютерное моделирование напряженного состояния сварного соединения из нержавеющей стали 03X18H9M3, выполненного многопроходной орбитальной сваркой // Сварка и диагностика, 2014, № 5 (30), С. 35–41.

6. Костичев В.Э. Повышение сопротивления усталости коленчатых валов тепловых двигателей: Дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2017. 146 с.
7. Букатый А.С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования: Дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2014. 152 с.
8. Митрофанова К.С. Конечно-элементное моделирование поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2016, № 5, С. 112–118.
9. Методические указания по построению расчетных моделей кузова автомобиля / сост. А.В. Куркин, А.А. Шакиров, С.С. Загребельный [и др.]. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 116 с.
10. Загребельный С.С., Шакиров А.А., Уланов А.М., Иванов М.А. Работоспособность сварных боковин модуля секции трамвая // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, 2013, Т. 13, № 2, С. 88–94.
11. Сапожников С.Б., Загребельный С.С., Шакиров А.А. Релаксация сварочных напряжений при помощи глубокого пластического деформиро-

вания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, 2013, Т. 13, № 2, С. 81–86.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009610110 Российская Федерация. Расчет параметров статико-импульсной обработки / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков [и др.]. 2009.
13. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Афонин А.Н., Волобуев А.В. Информационно-аналитическое обеспечение упрочнения статико-импульсной обработкой / под ред. А.В. Киричека. М.: Машиностроение-1, 2009. 170 с.
14. Kirichek A., Barinov S., Yashin A. Visualization of the process of processing welds by a deformation wave // CEUR Workshop Proceedings, 2020, Vol. 2744. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2744/short39.pdf> DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-39.
15. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V. et al. Evaluation of the effect of various types of tools on a weld joint during wave strain hardening // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, Vol. 1064, Art. 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012002.

REFERENCES

1. Zhidkov ME, Kirichek AV, Lebedev VA, Solovyov DL, Silantyev SA, Barinov SV. Prospects for applying wave deformation hardening of welds of reactor vessels. *Transport Engineering*. 2024;11: 24-30. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-24-30.
2. Kirichek AV, Solovyov DL, Lazutkin AG. Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie; 2004.
3. Kirichek AV, Solovyov DL, Barinov SV, Tarasov DE. Increasing contact endurance by heterogeneous wave deformation hardening. *Handbook of surface plastic deformation processes*. Irkutsk: IRNTU Publishing House; 2022.
4. Bukleshev DO, Yagovkin NG. Mathematical modeling of stress formation in the weld zones of gas pipelines and their behavior under load using ANSYS software. *NEFTEGAZ Territory*. 2016;10:88-92.
5. Bilenko GA, Morgunov EA, Korobov YuS. Computer simulation of the stress state of a stainless steel 03X18N9M3 welded joint made by multipass orbital welding. *Svarka I Diagnostika*. 2014;5(30):35-41.
6. Kostichev VE. Increasing resistance fatigue of crankshafts of heat engines [dissertation]. [Samara (RF)]; 2017.
7. Bukaty AS. Improving the accuracy of manufacturing critical engine parts by means of static and dynamic modeling [dissertation]. [Samara (RF)]; 2014.

8. Mitrofanova K.S. Finite element modeling of surface plastic deformation with a multiradius roller. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016;5:112-118.
9. Kurkin AV, Shakirov AA, Zagrebely SS. Methodological guidelines for the construction of computational models of a car body. Ulyanovsk: UISTU; 2013.
10. Zagrebely SS, Shakirov AA, Ulanov AM, Ivanov MA. Operability of welded sidewalls of the tram section module. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. 2013;13(2):88-94.
11. Sapozhnikov S.B., Zagrebely S.S., Shakirov A.A. Relaxation of welding stresses by deep plastic deformation. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. 2013;13(2):81-86.
12. Kirichek AV, Solovyov DL, Zhirkov AA. Calculation of static pulse processing parameters. RF Certificate of state registration of the computer program No. 2009610110. 2009.
13. Kirichek AV, Solovyov DL, Aфонин AN, Волобуев AV. Information and analytical support for hardening by static pulse processing. Moscow: Mashinostroenie-1; 2009.
14. Kirichek A, Barinov S, Yashin A. Visualization of the process of processing welds by a deformation wave. *CEUR Workshop Proceedings [Internet]*. 2020;2744. Available from: <http://ceur-ws.org/Vol-2744/short39.pdf> DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-39.

15. Kirichek AV, Barinov SV, Yashin AV. Evaluation of the effect of various types of tools on a weld joint during wave strain hardening. IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1064:012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012002.

Информация об авторах:

Жидков Максим Евгеньевич – директор филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», тел. +7(863) 929-29-29.

Лебедев Валерий Александрович – кандидат технических наук профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения, тел. +7 (863) 273-83-60.

Zhidkov Maksim Evgenievich – Director of the branch of AEM-Technologies Atommash, phone: +7(863) 929-29-29.

Lebedev Valery Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering, phone: +7 (863) 273-83-60.

Киричек Андрей Викторович – доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию, тел. (4832) 51-51-38.

Баринов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры ТМС, тел. (49234) 77-1-44.

Kirichek Andrey Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Pro-rector for Advanced Development, phone: (4832) 51-51-38.

Barinov Sergey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, phone: (49234) 77-1-44.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 03.03.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 27.03.2026. Рецензент – Куц В.В., доктор технических наук, профессор Юго-Западного государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 03.03.2026; approved after review on 12.03.2026; accepted for publication on 27.03.2026. The reviewer is Kuts V.V, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Southwest State University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.