

УДК 681.5.015
DOI: 10.18799/29495407/2025/1/84
Шифр специальности ВАК: 2.3.7

Автоматизация расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций общего назначения в программной среде Salome_Meca

М.В. Жуковец✉

*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь, г. Минск*

✉mikhailzhukavets@gmail.com

Аннотация. Демонстрируются принципы автоматизации инженерной технологии расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций общего назначения с помощью модуля YACS (программная среда Salome_Meca) – инструмента для автоматизации моделирования с помощью схем расчета. Данная технология может быть использована конструкторскими бюро для оперативного определения оптимальных сварочных соединений, так как технология, в отличие от термомеханической задачи, менее ресурсоемкая и позволяет быстрее определять напряженно-деформированное состояние сварных конструкций, тем самым уменьшая время проектирования.

Ключевые слова: автоматизация моделирования, инженерная технология, напряжения, деформации, сварные конструкции, напряженно-деформированное состояние

Благодарности: Автор выражает благодарность своему научному руководителю Сергею Викторовичу Медведеву, доктору технических наук, за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

Для цитирования: Жуковец М.В. Автоматизация расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций общего назначения в программной среде Salome_Meca // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 1. – С. 21–28. DOI: 10.18799/29495407/2025/1/84

UDC 681.5.015
DOI: 10.18799/29495407/2025/1/84

Automation in calculating stress-strain state of general-purpose welded structures in the programm Salome_Meca

M.V. Zhukavets✉

*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

✉mikhailzhukavets@gmail.com

Abstract. The paper demonstrates the principles of automation of engineering technology for calculating the stress-strain state of general-purpose welded structures using the YACS module (Salome_Meca software environment) – a tool for automating modeling using calculation schemes. This technology can be used by design bureaus to quickly determine optimal welded joints, since this technology, unlike the thermomechanical problem, is less resource-intensive and allows for faster determination of the stress-strain state of welded structures, thereby reducing design time.

Keywords: automation of modeling, engineering technology, stress, deformation, welded structures, stress-strain state

Acknowledgements: The author expresses the gratitude to the scientific supervisor Sergey V. Medvedev, Dr. Sc., for valuable advice in planning the study and recommendations on the design of the article.

For citation: Zhukavets M.V. Automation in calculating stress-strain state of general-purpose welded structures in the programm Salome_Meca. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 1, pp. 21–28. DOI: 10.18799/29495407/2025/1/84

Введение

Целью автоматизации моделирования сварных конструкций является оперативное получение конструкторской службой представлений о напряженно-деформированном состоянии (НДС) конструкций после сварки (величина и направление остаточных деформаций) для сравнения с закладываемыми на сборочных чертежах допусках. Имея эти данные, конструкторская служба сможет откорректировать схему закрепления изделия в технологически необходимой сборочно-сварочной оснастке при сварке [1].

Подходы, применяемые при моделировании сварочных явлений

Исходным источником изложенной здесь концепции силового метода являются положения упрощенной теории сварочных напряжений и деформаций [2, 3]. Согласно этой теории, расчеты проводят для стадии остывания металла шва. Главное положение теории: каждый металл резко теряет свою способность сопротивляться пластическим деформациям при превышении определенного для него температурного порога, когда временное сопротивление σ_B предельно близко к нулевому значению. Граница зоны перехода определяется обычным расчетом поля температур от движущегося источника теплоты при сварке. При этом поперечное сечение шва «обрастает» зоной, граница кото-

рой – зона пластических деформаций. Объем металла сварного шва, где происходят необратимые пластические деформации при $\sigma_B \rightarrow 0$, кристаллизуется по законам, схожим с остыванием слитка в кокиле. Продольную равнодействующую усадочную силу $P_{ус.пр}$, действующую вдоль оси шва, можно определить по расчетам работ [4, 5]. Силы, возникающие в плоскости сечения гипотетического T_k -слитка необратимых пластических деформаций, взаимодействуют с $P_{ус.пр}$ (рис. 1). Результат такого взаимодействия – реальные остаточные деформации сборочно-сварочных изделий (ССИ).

С.В. Медведев [2] выделил основные шаги алгоритма расчета остаточных напряжений и деформаций в упрощенной трехмерной постановке на компьютерных твердотельных моделях ССИ:

Шаг 1. Определить тип анализируемого шва (стыковой, тавровый, угловой, нахлесточный, нестандартный).

Шаг 2. Для выбранного типа шва определить $P_{ус.пр}$ в соответствии с методикой работ [6, 7].

Шаг 3. По значению $P_{ус.пр}$ определить продольное укорочение $\Delta_{пр}$ в окрестностях выбранного шва, а также интенсивность продольной нагрузки:

$$q_{пр} = P_{ус.пр} / S_{стпр},$$

где $S_{стпр}$ – площадь пластической зоны в окрестностях сечения шва.

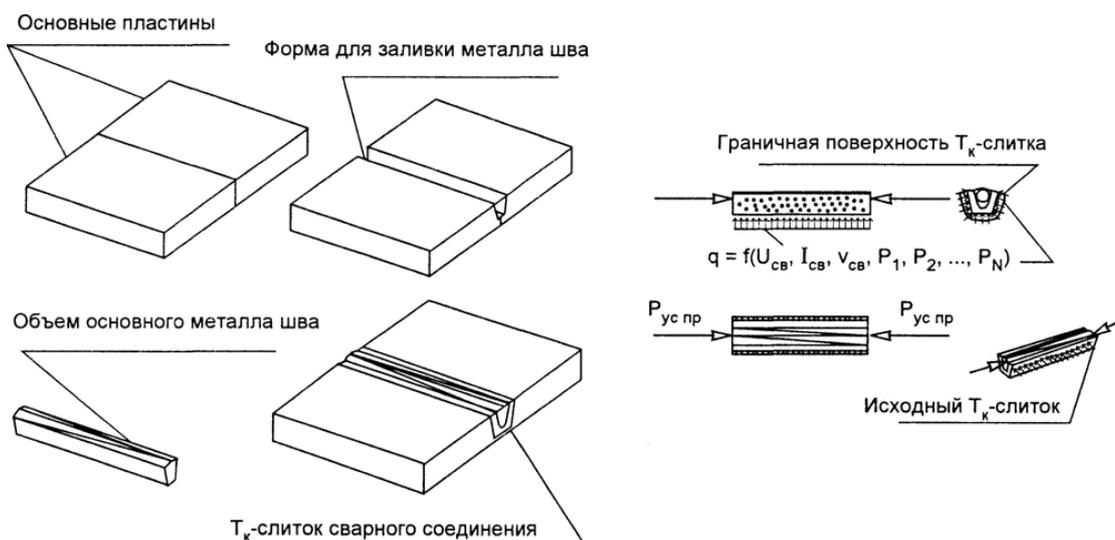


Рис. 1. Основные допущения инженерной методики компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния сварного соединения

Fig. 1. Basic assumptions of the engineering methodology for computer modeling of the stress-strain state of a welded joint

Шаг 4. Определить поперечное укорочение Δ_n в середине шва [6]:

$$\Delta_n = A \cdot \alpha \cdot q_{\text{э}} / c \cdot \gamma \cdot v_{\text{св}} \cdot \delta,$$

где A – эмпирический коэффициент, приблизительно равный 1,0–1,2 – при дуговой сварке с полным проплавлением [8]; α – температурный коэффициент линейного расширения; c – средняя теплоемкость металла; γ – удельный вес металла; $q_{\text{э}}$ – эффективная мощность сварочной дуги; $v_{\text{св}}$ – скорость сварки; δ – толщина листа.

Поперечное укорочение Δ'_n с учетом влияния продольных пластических деформаций на поперечное укорочение [9]:

$$\Delta'_n = (1 + k_{\mu}) \cdot \Delta_n,$$

где k_{μ} – коэффициент, показывающий, какую долю составляет дополнительное поперечное укорочение от поперечного укорочения (для низколегированных сталей $k_{\mu} = 0,2$).

Шаг 5. Определить по методике работы [7] поперечную усадочную силу $P_{\text{ус.п}}$:

$$P_{\text{ус.п}} = \Delta'_n \cdot E \cdot L \cdot h_1 / 2 \cdot b_1,$$

где E – модуль упругости; L – длина шва; h_1 – толщина пластины; b_1 – ширина зоны пластических деформаций; на основе $P_{\text{ус.п}}$ вычислить ее интенсивность q_{non} :

$$q_{\text{non}} = P_{\text{ус.п}} / S_{\text{от}},$$

где $S_{\text{от}}$ – площадь области тела мгновенного обжата длиной L , ограниченной эллиптической поверхностью T_k -слитка, необратимых пластических деформаций с полуосями $b_1/2$ и h_1 (рис. 2).

Значение Δ_n (Δ'_n) зависит от следующих факторов [10]: удельного тепловложения, параметров режима сварки; теплоотдачи с поверхностей свариваемых деталей; предварительного напряжения за счет ранее выполненных сварных швов; условия закрепления деталей; продольных пластических деформаций.

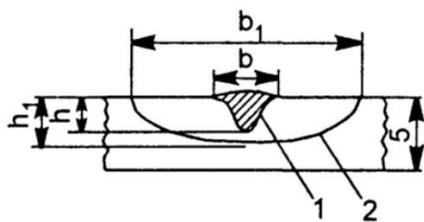


Рис. 2. Параметры стыкового сварного соединения, обуславливающие поперечные и угловые деформации: 1 – граница зоны проплавления (T_{nl}), 2 – граница зоны прогрева (T_o)

Fig. 2. Parameters of a butt weld joint that determine transverse and angular deformations: 1 – boundary of the melting zone (T_{nl}), 2 – boundary of the heating zone (T_o)

Ниже будет представлено развитие представленных положений в концепции силового метода.

В соответствии с предлагаемым в статье силовым методом определения сварочных напряжений σ и деформаций ε [1, 2] сварочная дуга при взаимодействии с металлом образует сварочную ванну – зону сплавления (ЗС). Размер этой зоны, в которой происходит расплавление металла (для низкоуглеродистых сталей температура плавления 1410–1550 °С), меньше другой температурной зоны, которая находится дальше от сварочной дуги, где уже нет расплавления, но имеют место фазовые превращения, – будем называть ее зоной термического влияния (ЗТВ). В ЗТВ наступает температурная пластичность и резко падает временное сопротивление σ_B , эта зона, например, для низкоуглеродистой стали ограничена изотермой 600–650 °С (рис. 3).

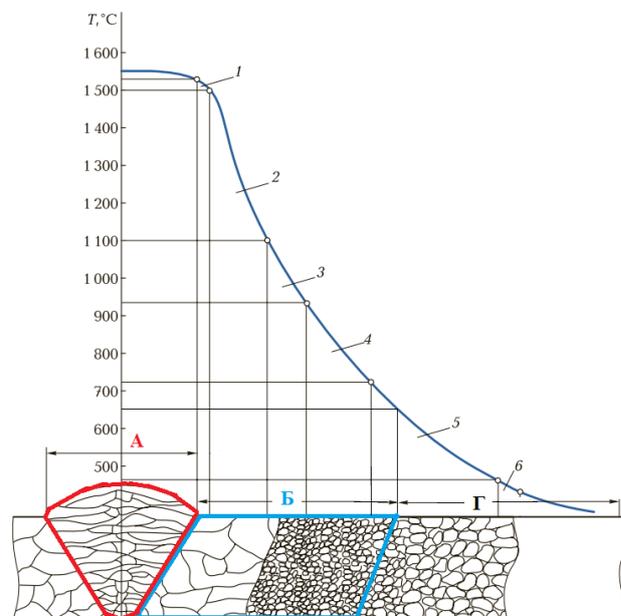


Рис. 3. Термический цикл сварки: А – зона сплавления (ЗС); Б – зона термического влияния (ЗТВ); Г – основной металл; 1 – неполное расплавление; 2 – перегрев; 3 – нормализация; 4 – неполная перекристаллизация; 5 – рекристаллизация; 6 – силеномкость

Fig. 3. Thermal cycle of welding: А – fusion zone (FZ); Б – heat-affected zone (HAZ); Г – base metal; 1 – incomplete melting; 2 – overheating; 3 – normalization; 4 – incomplete recrystallization; 5 – recrystallization; 6 – blue brittleness

Как видно из рис. 1, ЗТВ включает в себя пять зон структурных преобразований в металле.

И ЗС, и ЗТВ, а также частично зона металла, соприкасающаяся с ЗТВ, испытывающие тепловое расширение в процессе сварки, после остывания стре-

мятся вернуться к своему первоначальному состоянию. Но из-за разности температур между ЗС и ЗТВ процесс этот происходит неравномерно. В ЗС процесс усадки происходит намного быстрее, но из-за того, что сечение ЗТВ намного больше ЗС и перепад температур в ней намного меньше, чем в ЗС, эта зона препятствует быстрой поперечной усадке в ЗС, из-за чего в ЗС возникают высокие растягивающие остаточные напряжения $\sigma_{ост}$, близкие к σ_T . Взаимное влияние друг на друга ЗС, ЗТВ и основного металла обусловлено результатом одновременно протекающих двух физических процессов: теплового расширения металла и силового взаимодействия соседних неодинаково расширяющихся слоев. Эти физические процессы (ε_n – наблюдаемые деформации) можно представить, как сумму двух составляющих [3]:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_a + \varepsilon_c,$$

где ε_a – свободная температурная деформация; ε_c – собственная деформация, вызываемая действием упругих сил со стороны окружающего металла.

Действие реакции ЗТВ уменьшает ε_n ЗС, которые не могут достигнуть максимума и в чистом виде представляют ε_a , поэтому для ЗС справедливо соотношение [11]:

$$|\varepsilon_n| < |\varepsilon_a|.$$

Чем выше жесткость металла свариваемой детали, тем выше сопротивление расширению ЗС и большая разность между максимально возможными ε_a и ε_n . Поэтому при максимально возможной жесткости металла, например, при наплавке узкого валика на широкую и толстую пластину $\varepsilon_n \rightarrow 0$, а $\varepsilon_c \cong -\varepsilon_a$. В противоположность толстой пластине на тонкой пластине сопротивление расширению в плоскости пластины намного больше, чем по толщине, соответственно, σ по толщине так малы, что ими можно пренебречь в расчетах. В то время как ε_n по толщине намного больше, чем в плоскости пластины.

Собственные деформации ε_c состоят из упругой $\varepsilon_{упр}$ и пластических частей $\varepsilon_{пл}$ [11]:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл}$$

Если в зоне металла σ_B резко не уменьшается, то в этой зоне только упругие ε_c и после полного остывания металла происходит полная разгрузка: $\sigma_{ост} \rightarrow 0$ и $\varepsilon_c \rightarrow 0$. Но в зонах ЗТВ и особенно в ЗС $\sigma_B \rightarrow 0$, поэтому к $\varepsilon_{упр}$ составляющей ε_c добавляется $\varepsilon_{пл}$ компонента.

Продольная и поперечная усадка сопровождается увеличением толщины ЗС – выпуклости шва при нагреве, которая сохраняется и после остывания.

Нагрев свариваемых пластин выше со стороны сварочного источника, поэтому поперечная усадка с этой стороны больше. Результат неравномерной поперечной усадки по толщине шва приводит к угловой деформации $\varepsilon_{угл}$. На рис. 4 представлен взаимный поворот свариваемых пластин вокруг продольной оси шва.

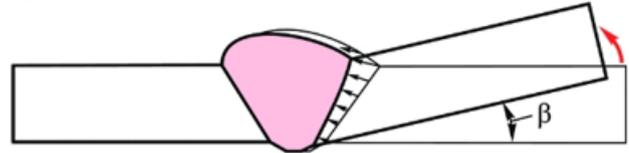


Рис. 4. Угловая деформация пластин $\varepsilon_{угл}$ вследствие неравномерной поперечной усадки

Fig. 4. Angular deformation of plates ε_{ang} due to uneven transverse shrinkage

При сварке двух пластин разной ширины σ_B изгибают сварное соединение в сторону более толстой пластины, а после остывания $\sigma_{ост}$ изгибают сварное соединение в сторону более узкой пластины (рис. 5).

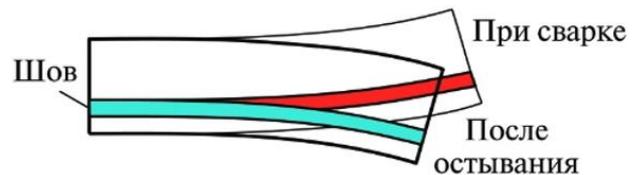


Рис. 5. Искривление двух пластин разной толщины вследствие продольной усадки

Fig. 5. Curvature of two plates of different thickness due to longitudinal shrinkage

Сущность силового метода – в приложении эквивалентных сил для создания в ЗС (расплавленный металл) и ЗТВ (зона необратимых изменений в металле, определяется изотермой границы таких изменений, для стали 650 °С) таких же деформаций ε и напряжений σ , как и от фактической продольной и поперечной усадки сварной конструкции. Согласно экспериментам, основной фактор, влияющий на усадочную силу, – $q_{п}$ – погонная энергия сварки (количество теплоты, поступившей в металл на единицу длины шва) [11]:

$$q_{п} = q/v_{св},$$

где q – часть мощности источника, поступившая в металл сварной конструкции; $v_{св}$ – скорость сварки.

Теоретически график распределения $\sigma_{ост}$ после сварки двух низкоуглеродистых (ферритоперлитных) пластин должен быть таким, как показан на рис. 6.

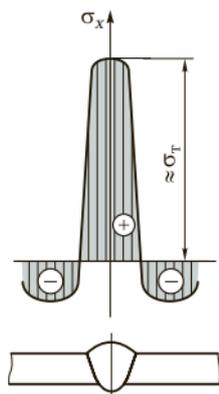


Рис. 6. Распределение $\sigma_{ост}$ вдоль шва в поперечном сечении сваренных пластин из низкоуглеродистой стали

Fig. 6. Distribution of σ_{res} along the weld in the cross section of welded low-carbon steel plates

Технология автоматизации расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций общего назначения

Целью автоматизации моделирования сварных конструкций является оперативное получение конструкторской службой представлений о напряженно-деформированном состоянии (НДС) конструкций после сварки (величина и направление остаточных деформаций) для сравнения с закладываемыми на сборочных чертежах допусках. Имея эти данные, конструкторская служба сможет откорректировать схему закрепления изделия в технологически необходимой сборочно-сварочной оснастке при сварке [1].

Представленная в статье технология применяет компьютерное моделирование методом конечных элементов (МКЭ). При этом вводится упрощение: $v_{св}$ принимается очень большой и нагрев одновременный по всей длине сварного шва. При этом изначальное условие при моделировании – однопроходная сварка, а значит, отсутствие начальных напряжений $\sigma_{нач}$, – две части сварной конструкции перед сваркой не напряжены и не деформированы. Шов при сварке укладывается симметрично. Внешние поверхности сварной конструкции являются адиабатическими границами (нет обмена теплотой с окружающим пространством).

Силовой метод заменяет собой термомеханическую задачу, поэтому параметры, важные при моделировании тепловых процессов: температурный коэффициент линейного расширения α , теплопроводность λ , объемная теплоемкость C' , коэффициент теплоотдачи с поверхности α_m , заменяются на силы (давление, равное σ_T металла), прикладываемые к торцам ЗС и ЗТВ для воссоздания продольной усадочной силы $P_{ус.пр}$, а для воссоздания поперечной усадочной силы $P_{ус.п}$ давление, равное σ_T металла, прикладывается на границе ЗС и ЗТВ, ЗТВ

и основного металла, при этом создается эффект растяжения ЗС и сжатия ЗТВ [2, 11], как на рис. 6. Схема приложения давлений на примере стыкового шва представлена на рис. 7.

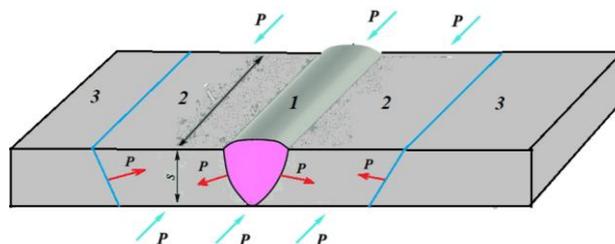


Рис. 7. Схема приложения давлений, равных σ , на модель свариваемых пластин при использовании силового метода: 1 – ЗС; 2 – ЗТВ; 3 – основной металл

Fig. 7. Scheme of application of pressure equal to σ to the model of welded plates using the force method: 1 – fusion zone (FZ); 2 – heat-affected zone (HAZ); 3 – base metal

Для моделирования $\sigma_{ост}$ и остаточных деформаций $\varepsilon_{ост}$ сварных конструкций использовалась программная среда *Salome_Meca* (версия 2022.0.0) со свободной лицензией, объединяющая универсальную платформу предварительной и постобработки численных моделей (включая импорт–экспорт различных популярных графических форматов: BREP, STEP, STL, IGES, XAO, VTK). Программная среда основана на открытой и гибкой архитектуре, состоящей из компонентов многократного использования и решателя конечных элементов *Code_Aster* с открытым исходным кодом для структурного механического и термического моделирования [12].

Для автоматизации интегрирования ЗС и ЗТВ в тело модели сварной конструкции, генерации расчетной сетки, автоматизации расчета используется модуль *YACS* [13] программной среды *Salome_Meca* – это инструмент для управления многопрофильным моделированием с помощью схем расчетов. Схема расчетов предоставляет средства для определения цепочки скриптов (на языке программирования Python) с входными и выходными параметрами или сопряжения кодов расчетов.

Как было выше указано, основным фактором, влияющим на определение ширины ЗТВ для возможности применения силового метода, является $q_{п}$ – погонная энергия сварки, которую можно вычислить по формуле [11]:

$$q_{п} = (I * U * \eta) / v_{св},$$

где I – сварочный ток; U – напряжение сварочного источника; η – КПД дуги; $v_{св}$ – скорость сварки.

Так как, согласно вышеприведенному упрощению, $v_{св}$ принята мгновенной, можно перейти от $q_{п}$ к эффективной мощности электрической дуги $q_{э}$, являющейся частью мощности сварочного источника q [5, 14]:

$$q_{э} = I * U * \eta.$$

Для практических инженерных задач, требующих быстрого решения, можно приближенно определить требуемое значение $q_{п}$ и, соответственно, $q_{э}$ по площади ЗС [11]:

$$q_{э} \cong A_{напл} * Q_v.$$

где $A_{напл}$ – площадь сечения ЗС; Q_v – коэффициент, определенный экспериментально [11], для ручной дуговой сварки, составляет 65 Дж/мм³.

С достаточной для практики точностью расчетная величина ЗТВ может быть определена по приближенной формуле Н.Н. Рыкалина [5, 14], которая для данного частного случая была изменена – исключается $v_{св}$:

$$b_1 = (0,484 * q_{э}) / (\delta * c * \gamma * t_{пласт}),$$

где $q_{э}$ – эффективная мощность сварочной дуги в кал, без учета времени t ; δ – толщина пластины, см; c – теплоемкость металла, кал/г*град, для стали $c=0,11$ кал/г*град; γ – удельный вес, г/см³; $t_{пласт}$ – температура изотермы зоны пластичности (ЗТВ), для стали принимается $t_{пласт}=650$ °С.

На рис. 8 представлен алгоритм автоматизации моделирования сварных конструкций с помощью модуля YACS интегрирования ЗТВ и ЗС в загружаемую геометрическую модель, а также автоматизация расчета в модуле Code_Aster. Необходимым условием выполнения алгоритма является предварительное создание подгружаемых схем расчета в формате XML, содержащих скрипты генерирования геометрических тел ЗТВ и ЗС на основе входных данных толщины стенок сварных конструкций и катетов шва (геометрия ЗС), а также взаимного расположения свариваемых стенок (торцевые, стыковые, нахлесточные швы и т. д.). Пользователь в модуле YACS вводит только начало и конец сварного шва, а подгружаемая схема генерирует внедряемые тела ЗС и ЗТВ. В случае криволинейного расположения сварного шва пользователь должен разбить сварной шов на несколько прямолинейных участков и указать координаты начала и конца каждого такого участка и для каждого прямолинейного участка подгружать расчетную схему.

На рис. 9 показано внедрение ЗТВ и ЗС двух прямолинейных швов в промышленную деталь крепления. Главная задача на этом этапе – получить слитую воедино геометрию нескольких тел и на ее основании однородную расчетную сетку, не накапливающую в себе ошибки расчета (рис. 10).



Рис. 8. Алгоритм автоматизации расчета напряженно-деформированного состояния сварных конструкций общего назначения в программной среде Salome_Meca

Fig. 8. Algorithm for automation of the calculation of stress-strain state of the general purpose welded structures in the program Salome_Meca

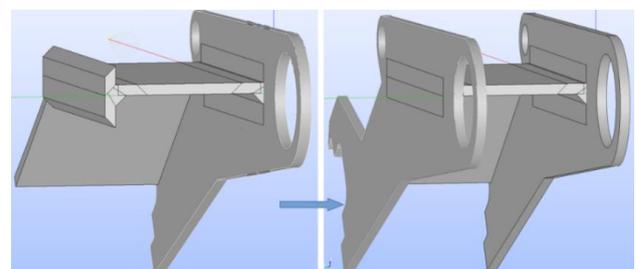


Рис. 9. Моделирование. Внедрение тела ЗС, ЗТВ в тело модели детали крепления (программная среда Salome_Meca 2022)

Fig. 9. Modeling. Embedding the FZ, HAZ into the body of the fastening part model (program Salome_Meca 2022)

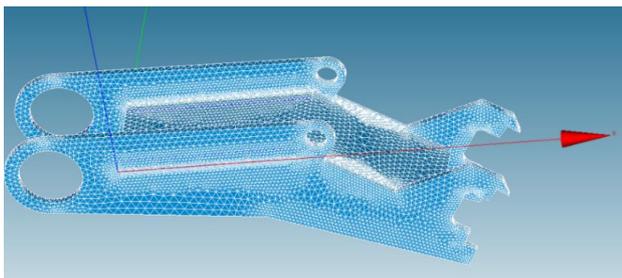


Рис. 10. Моделирование. Создание расчетной сетки детали крепления (программная среда Salome_Meca 2022)

Fig. 10. Modeling. Creating the computational mesh for the fastening part model (program Salome_Meca 2022)

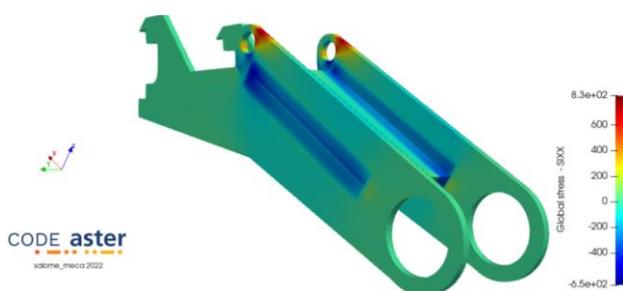


Рис. 11. Моделирование. Демонстрация напряжений модели, МПа (программная среда Salome_Meca 2022)

Fig. 11. Modeling. Demonstration of model stresses, MPa (program Salome_Meca 2022)

После внедрения геометрических тел модель должна вести себя как единое тело и воспроизводить, после проведения расчета, реальные остаточные явления после сварки. На рис. 11 продемонстрирован результат расчета напряжений модели детали крепления.

Заключение

Представленная в статье технология автоматизации расчета НДС сварных конструкций создает трехмерные твердотельные модели сварной конструкции с автоматическим внедрением на основе подгружаемых схем ЗС и ЗТВ, а на следующем этапе позволяет генерировать корректную конечно-элементную сетку с последующим расчетом на ней НДС сварной конструкции при условии одновременной сварки всех сварных швов в свободном состоянии.

Конструкторское подразделение по результатам вычислительных операций должно получить укрупненное представление о величине и направлении остаточных деформаций для сравнения закладываемых на сборочных чертежах допусках. Технологическая служба на основании полученного в расчетах уточненного НДС конструкции, которое может существенно отличаться от запланированного НДС, может составлять новые схемы нанесения сварных швов и заново тестировать модель. К модели конструкции могут прикладываться внешние эксплуатационные нагрузки, полученные результаты должны анализироваться совместно с конструкторской и технологическими службами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев С.В., Жуковец М.В. Компьютерные технологии прогнозирования остаточных сварочных явлений при дуговой сварке конструкций общего назначения // Актуальные вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2022. – С. 159–163. EDN: XSAKLG
2. Медведев С.В. Компьютерное моделирование остаточных сварочных деформаций при технологическом проектировании сварных конструкций // Сварочное производство. – 2001. – № 8. – С. 10–18.
3. Тальпов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. – М.: Машиностроение, 1973. – 278 с.
4. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с. EDN: YNQVBF
5. Трочук И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. – М.: Машгиз, 1964. – 247 с.
6. Николаев Г.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.
7. Напряжения и деформации при сварке / Б.С. Касаткин, В.М. Прохоренко, И.М. Чертов и др. – Киев: Вища школа, 1987. – 246 с.
8. Сварка и свариваемые материалы: В 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
9. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Судостроение, 1974. – 286 с.
10. Ермолаев Г.В., Сагалевиц В.М. Деформации сварных конструкций от поперечной усадки швов. – М.: б. и., 1970. – 62 с.
11. Куркин А.С., Лукьянов В.Ф. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 264 с. EDN: GVWXQQ
12. Documentation – Code_Aster. URL: <https://www.code-aster.org> (дата обращения 02.10.2024).
13. Documentation – The YACS User Guide. URL: <https://docs.salome-platform.org/latest/gui/YACS/using.html> (дата обращения 02.10.2024).
14. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

Информация об авторах

Михаил Владимирович Жуковец, инженер-программист 1-й категории, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь, 220072, г. Минск, ул. Сурганова, 6; mikhailzhukavets@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5008-6577>

Поступила в редакцию: 05.02.2025

Поступила после рецензирования: 10.03.2025

Принята к публикации: 25.03.2025

REFERENCES

1. Medvedev S.V., Zhukavets M.V. Computer technologies for prediction of residual welding phenomena in arc welding of general-purpose constructions. Current issues and advanced welding technologies in science and industry. *Proceedings of the I International scientific-technical conference*. Mogilev, Belarusian-Russian University Publ., 2022. pp. 159–163. (In Russ.) EDN: XSAKLG
2. Medvedev S.V. Computer modeling of residual welding deformations in the technological design of welded structures. *Welding production*, 2001, no. 8, pp. 10–18. (In Russ.)
3. Talypov G.B. *Welding deformations and stresses*. Leningrad, Mechanical Engineering Publ., 1973. 278 p. (In Russ.)
4. Vinokurov V.A., Grigoryants A.G. Theory of welding deformations and stresses. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (In Russ.) EDN: YNQBPF
5. Trochun I.P. *Internal forces and deformations during welding*. Moscow, Mashgiz Publ., 1964. 247 p. (In Russ.)
6. Nikolaev G.A., Vinokurov V.A. *Welded structures. Calculation and design*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 446 p. (In Russ.)
7. Kasatkin B.S., Prokhorenko V.M., Chertov I.M. *Stresses and deformations in welding*. Kyiv, Higher school Publ., 1987. 246 p. (In Russ.)
8. *Welding and welded materials. In 3 vol. Vol. 1. Weldability of materials. Reference publication*. Ed. by E.L. Makarov. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 528 p. (In Russ.)
9. Kuzminov S.A. *Welding deformations of ship hull structures*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1974. 286 p. (In Russ.)
10. Ermolaev G.V., Sagalevich V.M. *Deformations of welded structures from transverse shrinkage of seams*. Moscow, 1970. 62 p. (In Russ.)
11. Kurkin A.S., Lukyanov V.F. *Welded structures. Calculation and design*. Moscow, N.E. Bauman Moscow State Technical University Publ. house, 2021. 264 p. (In Russ.) EDN: GVWXQQ
12. *Documentation – Code_Aster*. (In Russ.) Available at: <https://www.code-aster.org> (accessed 2 October 2024).
13. *Documentation – The YACS User Guide*. (In Russ.) Available at: <https://docs.salome-platform.org/latest/gui/YACS/using.html> (accessed 2 October 2024).
14. Rykalin N.N. *Calculations of thermal processes during welding*. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 296 p. (In Russ.)

Information about the author

Mikhail V. Zhukavets, Software Engineer, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, 6, Surganov street, Minsk, 220072, Republic of Belarus; mikhailzhukavets@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5008-6577>

Received: 05.02.2025

Revised: 10.03.2025

Accepted: 25.03.2025