

УДК 681.5.015

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ  
КОНСТРУКЦИЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*С. В. МЕДВЕДЕВ, М. В. ЖУКОВЕЦ*

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

UDC 681.5.015

**COMPUTER TECHNOLOGIES FOR PREDICTION OF RESIDUAL  
WELDING PHENOMENA IN ARC WELDING OF GENERAL PURPOSE  
CONSTRUCTIONS**

*S. V. MEDVEDEV, M. V. ZUKOVEC*

**Аннотация.** Обоснованы предпосылки разработки и требования к компьютерным (суперкомпьютерным) технологиям прогнозирования; получено практическое подтверждение выдвинутых теоретических положений; показаны направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** сварные конструкции общего назначения, компьютерные и суперкомпьютерные технологии, остаточные явления, прогнозирование, дуговая сварка.

**Abstract.** Development background and requirements for computer (supercomputer) forecasting technologies are substantiated. Practical confirmation of the put forward theoretical positions has been received, directions for further research are shown.

**Keywords:** general purpose welded constructions, computer and supercomputer technologies, residual effects, forecasting, arc welding.

Рыночные условия заставляют разработчиков сварных конструкций искать новые подходы проектирования и моделирования, способствующие повышению уровня конкурентных преимуществ.

Как правило, на большинстве машиностроительных предприятий реального сектора экономики сварные конструкции разрабатываются специалистами без базовой сварочной подготовки в универсальных графических системах; полученные при этом твердотельные модели деталей и узлов сварных конструкций передаются в расчетные системы конечно-элементного анализа, в которых на данный момент, к сожалению, особенности сварочных процессов учтены в недостаточной степени.

Цель работы – представить разработанные авторами программно-методические средства автоматизированного проектирования и моделирования сварных конструкций общего назначения, использование которых позволяет сблизить позиции разработчиков и расчетчиков с тем, чтобы конструкторские службы оперативно получили представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) конструкции после сварки, а технологическое подразделение

более глубоко проникло в состояние и проблемы напряженной сварной конструкции, находящейся под эксплуатационными нагрузками.

Анализ работ предшественников и собственный многолетний научно-методический задел позволяют в следующем виде сформулировать инженерные требования к методу и суперкомпьютерной технологии прогнозирования остаточных сварочных явлений:

- при создании трехмерной твердотельной модели сварной конструкции и указании на ней типа сварного шва программным образом в соответствии со стандартными параметрами сварочного режима для данного типа основного металла необходимо создать модели зон сплавления и термического влияния; эти модели должны автоматически интегрироваться в исходную конструкторскую модель;

- в интерактивно-алгоритмическом режиме требуется создать корректную конечно-элементную сетку с последующим расчетом на ней НДС сварной конструкции при одновременной сварке всех сварных швов в свободном состоянии в пространственном положении, наиболее пригодном для нанесения и кристаллизации сварных швов;

- конструкторское подразделение по результатам суперкомпьютерного вычислительного эксперимента должно получить укрупненное представление о величине и направлении остаточных деформаций для сравнения с закладываемыми на сборочном чертеже допусками;

- технологическая служба должна иметь возможность уточнить схему закрепления изделия в технологически необходимой сборочно-сварочной оснастке при сварке, учитывая последовательность и направления нанесения сварных швов, формируя при этом уточненное НДС конструкции, которое может существенно отличаться от НДС предыдущего этапа; к модели с уточненным НДС прикладываются внешние эксплуатационные нагрузки; полученные результаты должны анализироваться совместно конструкторской и технологической службами.

Основные научно-методические положения метода и суперкомпьютерной технологии [1–3].

1. Зона сплавления имеется во всех соединениях и может быть определена по ГОСТам или по связям с параметрами сварочных режимов (номинальные размеры при комнатной температуре).

2. Зона термического влияния (ЗТВ) имеет определенную связь с зоной сплавления; эта связь поддается аналитическому и/или эмпирическому определению.

3. Теоретически обоснованно и экспериментально подтверждено наличие в поперечном сечении стыковых швов растягивающих напряжений, достигающих предела текучести основного металла; при этом в ЗТВ напряжения в основном сжимающие, не более предела текучести.

4. Принимая во внимание упрощенные теории сварочных напряжений и деформаций, когда исследуется лишь остывание нагретой конструкции от 600 °С до комнатной температуры, рассчитываем по известным термодинамическим зависимостям эквидистантные увеличения сечений зон сплавления и ЗТВ;

механические свойства этих зон принимаются такими, какими они становятся при комнатной температуре и могут быть экспериментально верифицированы.

5. Растягивающие напряжения в поперечных сечениях швов – результат пластической необратимой деформации моделей ЗТВ, к поверхностям которых приложены напряжения, эквивалентные пределу текучести основного металла или превышающие его; модель поведения материала ЗТВ обладает упругими и пластическими свойствами, но пластические преобладают; зона сплавления имеет также комбинацию свойств, но упругие свойства преобладают.

6. Имеются различия в схемах силового нагружения пространственных замкнутых, разомкнутых и прямолинейных швов:

- в замкнутых швах нагружаются давлением, эквивалентным пределу текучести, все поверхности трехмерной модели ЗТВ;
- в разомкнутых швах нагружают все боковые и торцевые поверхности ЗТВ;
- в линейных швах нагружают все поверхности ЗТВ и торцевые поверхности зоны сплавления.

7. За счет беспрепятственной деформации упруго пластических и пластически упругих зон сплавления и термического влияния формируется в пространстве и во времени равновесное состояние сварной конструкции с остаточными деформациями и напряжениями по объему сварного шва, что, в конечном итоге, приводит к локальному повышению жесткости сварного соединения, не подвергавшегося термической обработке.

На рис. 1 и 2 показаны качественные и количественные результаты использования рассматриваемой методики компьютерного (суперкомпьютерного) моделирования остаточных сварочных явлений, которые с достаточной инженерной точностью соотносятся с аналитическими результатами по наплавке валика на кромку пластины.

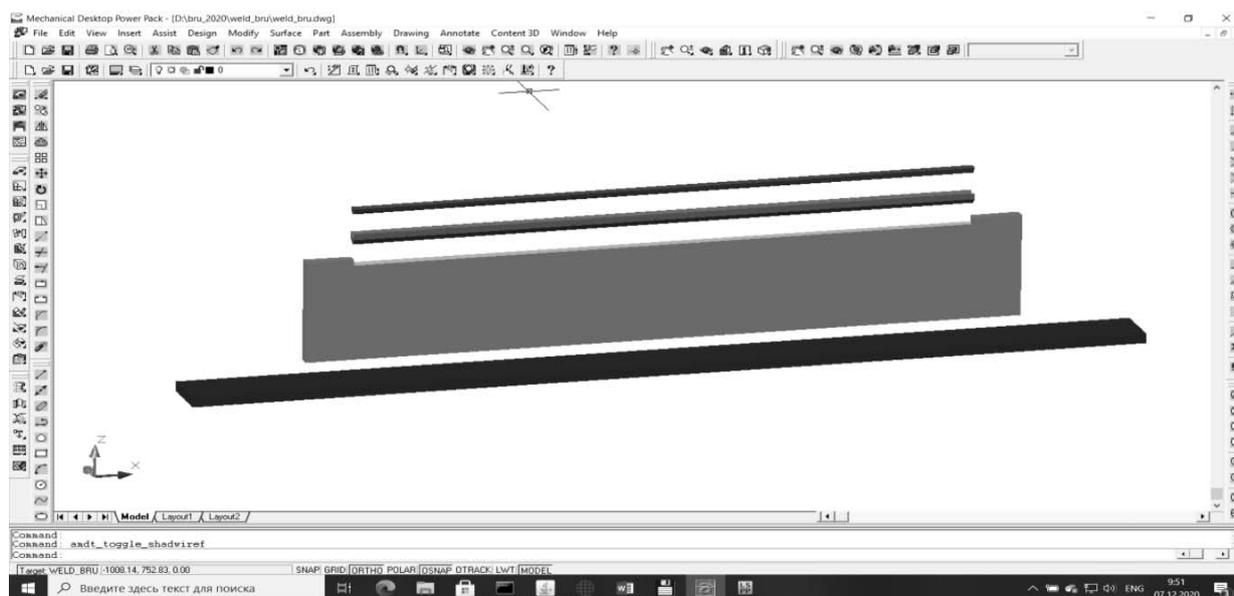
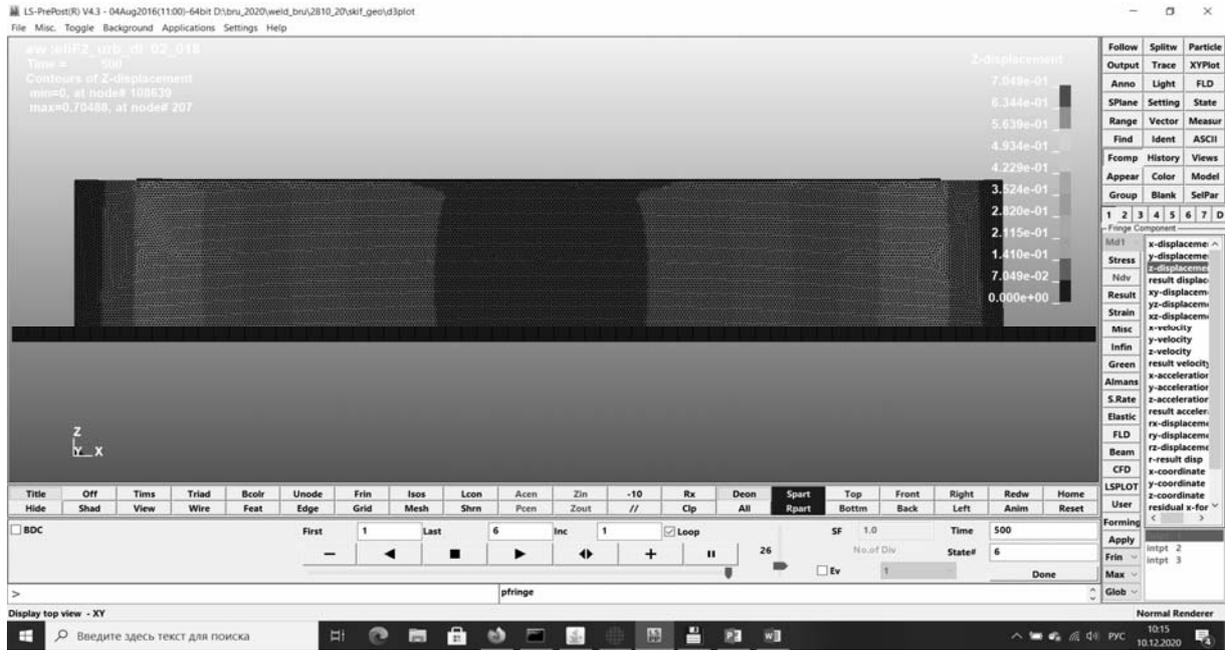


Рис. 1. Составные части твердотельной модели: зона сплавления, зона термического влияния, основной металл

a)



б)

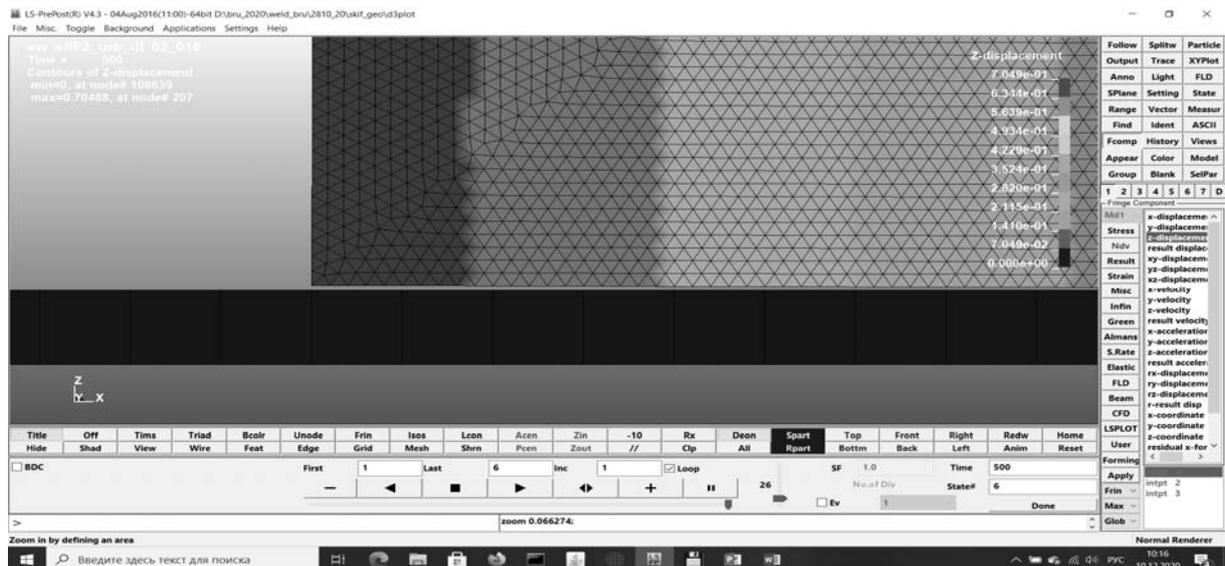


Рис. 2. Характер изменения остаточных деформаций пластины по вертикали: *a* – общий вид; *б* – деформации в районе торца пластины

Направления дальнейших исследований и разработок видятся в совершенствовании программных пользовательских интерфейсов, уточнении зависимостей геометрических размеров зон сплавления и термического влияния, переход к прогнозному моделированию остаточных явлений сварных конструкций из легированных сталей при наличии в них структурных превращений.

Рассматриваемые компьютерные технологии прогнозирования остаточных сварочных напряжений и деформаций сварных конструкций общего назначения при дуговых способах сварки могут использоваться как составная часть программно-методического обеспечения научно-образовательного грид-сегмента сборочно-сварочной направленности, разрабатываемого ОИПИ НАН Беларуси совместно со сварочными кафедрами вузов и промышленными предприятиями [4].

*Авторы открыты для взаимовыгодного сотрудничества с заинтересованными структурами и отдельными специалистами.*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Медведев, С. В.** Компьютерное моделирование остаточных сварочных деформаций в технологическом проектировании сварных конструкций / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2001. – № 8. – С. 10–18.

2. **Medvedev, S. V.** Computer and supercomputer technologies for the design and technological design of welded structures [Electronic resource] / S. V. Medvedev, K. A. Klimov // The 4th IIW South–East European Welding Congress «Safe Welded Construction by High Quality Welding» (10–13 October 2018), Belgrade, Serbia. – Mode of access: <http://seeiiw2018.duzs.org.rs>. – Date of access: 10.11.2021.

3. **Медведев, С. В.** Конструктивно-технологическое проектирование и моделирование сварных конструкций в распределенных суперкомпьютерных средах / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 24–29.

4. **Медведев, С. В.** Основные направления разработки научно-образовательного грид-сегмента для предприятий и вузов машиностроительного профиля [Электронный ресурс] / С. В. Медведев, О. П. Чиж, В. М. Матюшенко. – Режим доступа: <http://2019.nscf.ru/prezentacii>. – Дата доступа: 10.11.2021.

E-mail: [medv@newman.bas-net.by](mailto:medv@newman.bas-net.by); [romannose@tut.by](mailto:romannose@tut.by).