DOI: 10.24412/2077-8481-2025-2-24-33

УДК 621

***В. А. ПОПКОВСКИЙ***, *канд. техн. наук*, *доц.*
***А. В. АЛЬХИМОВИЧ***
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПОСАДКЕ ШКИВА НА ПОЛЫЙ ВАЛ

**Аннотация**

Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов образования поля остаточных напряжений при горячей посадке шкива на полый вал с учетом нелинейностей, обусловленных упругопластическим деформированием и нестационарным температурным полем.

**Ключевые слова**:

компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, горячая посадка шкива на полый вал.

**Для цитирования**:

Попковский, В. А. Упругопластическое деформирование при горячей посадке шкива на полый вал / В. А. Попковский, А. В. Альхимович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 2 (87). – С. 24–33.

## *Введение*

В [1] были представлены результаты имитационного моделирования образования поля остаточных напряжений при горячей посадке шкива на полый вал. Отличительной особенностью этой разработки являлось то, что в ней в первом приближении предполагалась линейная взаимосвязь между напряжениями и деформациями (считается справедливым закон Гука). Кроме того, считалось, что перед посадкой шкив равномерно нагрет до температуры 100 ºС и в последующем остывает без теплопередачи полому валу. Вместе с тем результаты численного имитационного моделирования показали, что установленные пиковые значения остаточных напряжений существенно превышают предел текучести рассматриваемого материала. Кроме того, вполне очевидно, что поле температур, образуемое в результате остывания шкива, формируется, в том числе и посредством теплоотвода в полый вал.

Таким образом, целью данной разработки является проведение совмещенного анализа нестационарного температурного поля и поля термоупругопластического деформирования при горячей посадке шкива на полый вал.

## *Анализ температурного поля в соединении «шкив – полый вал» с учетом теплоотвода в окружающую среду и вал*

Проведение анализа переходного теплового процесса в соединении «шкив – полый вал» осуществлялось с использованием той же твердотельной модели, что использовалась на предыдущем этапе имитационного моделирования. При этом рассматривался отрезок времени в 1000 с с шагом, равным 10 с (рис. 1).

На рис. 2 приведена информация о том, что с наружной поверхности соединения осуществляется теплообмен с коэффициентом конвективной теплоотдачи 20 Вт/(м$^2$·К) при температуре окружающей среды 293 К (20 °С), а также начальными температурами вала 20 °С и шкива 120 °С.

© Попковский В. А., Альхимович А. В., 2025

Здесь следует отметить, что в рассматриваемой модели теплового процесса, происходящего при горячей посадке, использовалось допущение об идеальном контакте между сопрягаемыми деталями, когда сопротивление теплопередаче между ними отсутствует. В действительности, в силу наличия микронеровностей на поверхностях соприкосновения, это сопротивление присутствует. Вместе с тем в процессе охлаждения и смятия микронеровностей данное сопротивление существенно снижается.

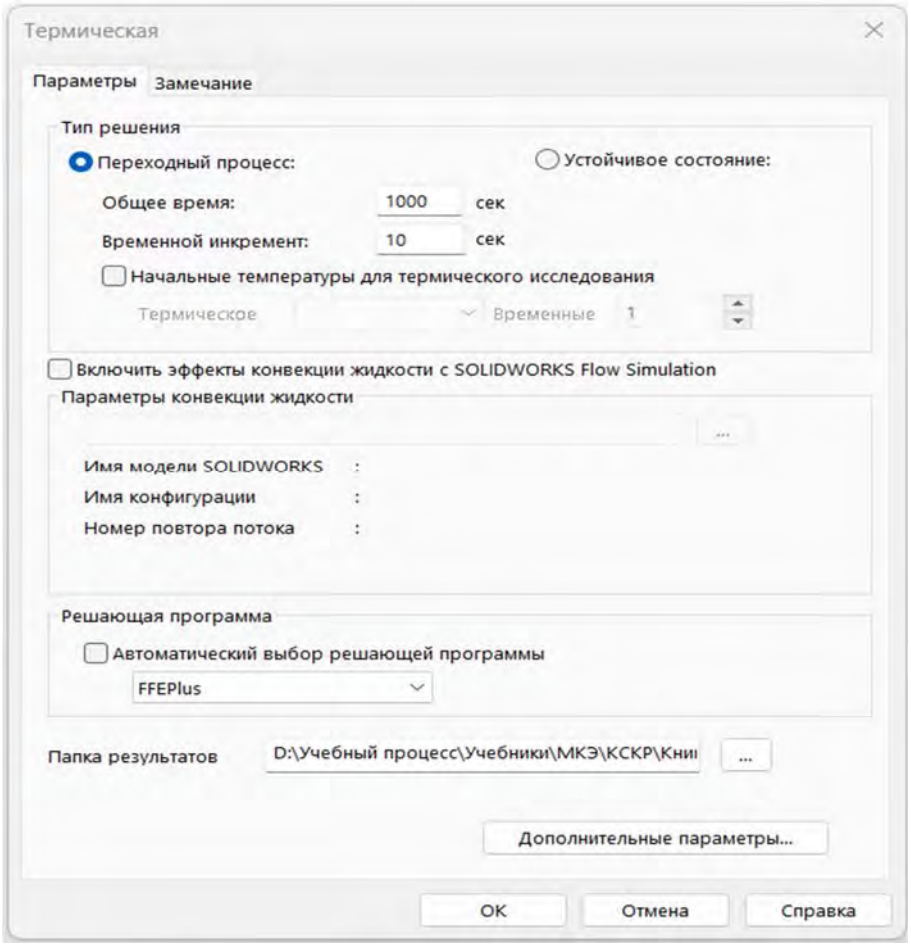


Рис. 1. Общее время анализа переходного теплового процесса остывания соединения и временной инкремент

В результате проведенного численного анализа была получена база данных о распределении температурного поля соединения в различные моменты времени. На рис. 3 представлена информация о распределении температур через 100 с после фиксации соединения. Кроме того, на данном рисунке указаны конкретные значения температур в наиболее характерных точках соединения.

На рис. 4 приведена кинетика изменения температур во времени в приведенных на рис. 3 характерных точках.

Как следует из рис. 4, к 800-м секундам охлаждения температуры в рассматриваемых характерных точках выравниваются и дальнейшее остывание уже не будет вносить существенный вклад в напряженное состояние соединения при горячей посадке.

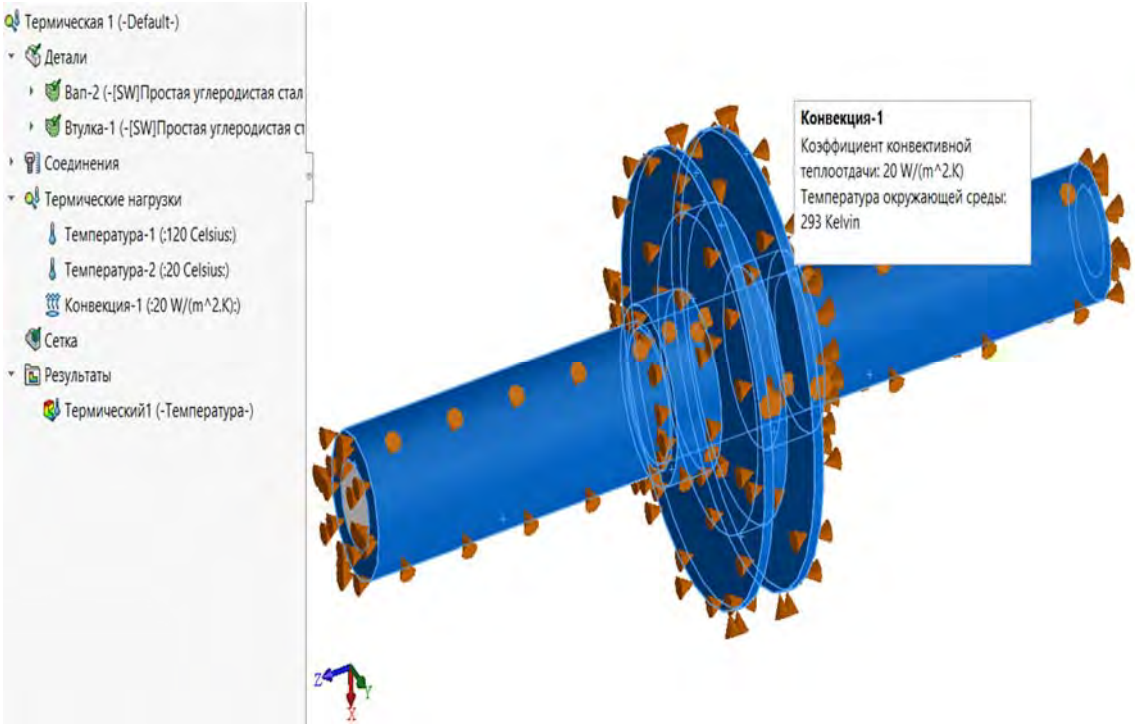


Рис. 2. Характеристики рассматриваемого переходного процесса

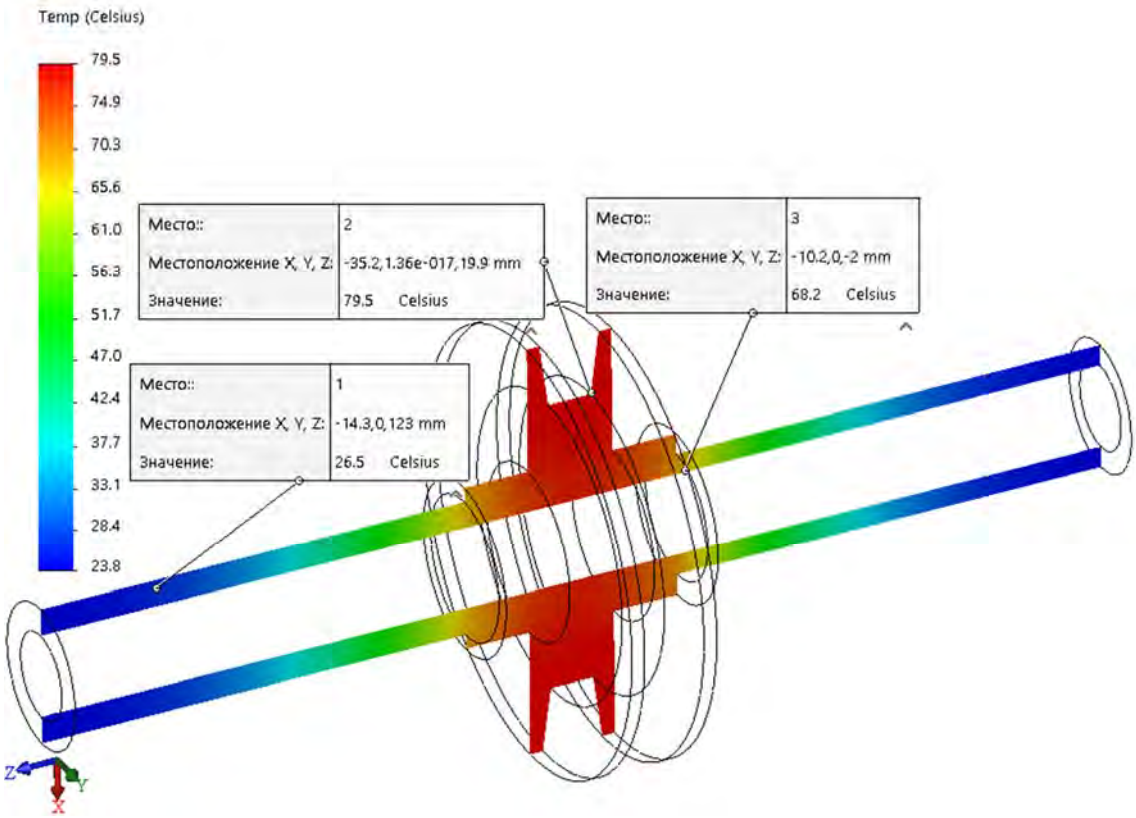


Рис. 3. Распределение температур по сечению соединения через 100 с после начала фиксации

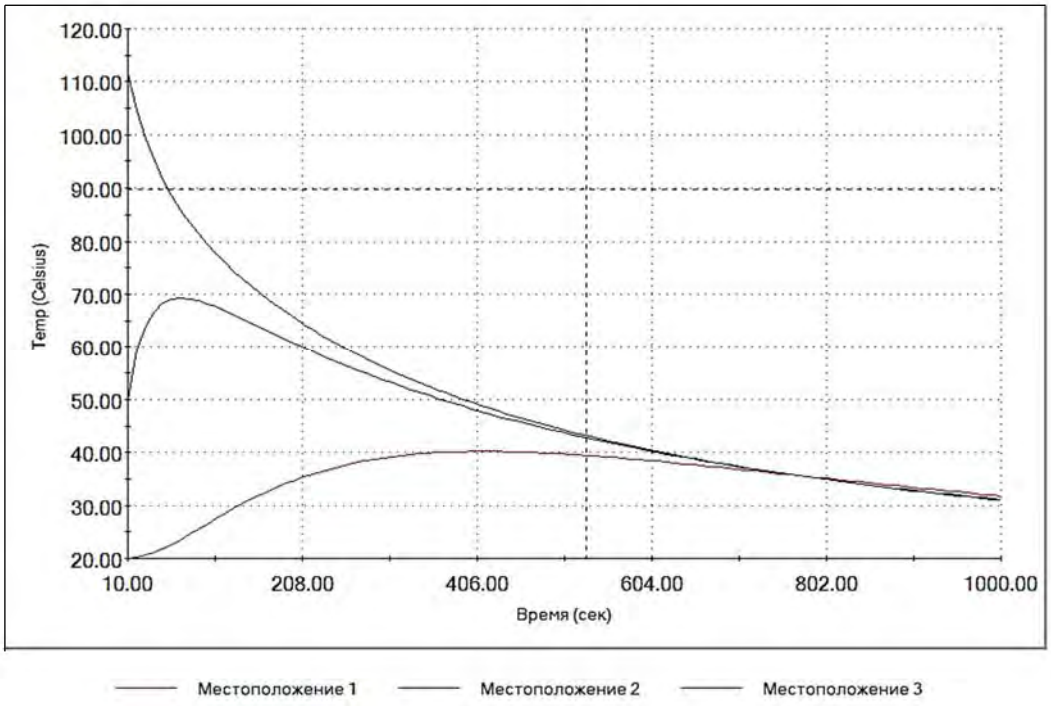


Рис. 4. Кинетика изменения температур во времени в трех характерных точках соединения (см. рис. 3)

В последующем информация о созданной базе данных кинетики изменения температурного поля будет являться исходной при анализе нелинейного упругопластического деформирования сочленяемых изделий.

### *Настройка и решение совмещенной задачи «Нестационарное температурное поле» и «Нелинейное упругопластическое деформирование деталей соединения»*

Как было установлено в [1], напряжения, возникающие в данном соединении при горячей посадке, могут существенно превышать предел текучести материала изделия. В связи с этим для адекватной оценки образуемого напряженно-деформированного состояния целесообразно учитывать нелинейность, связанную с упругопластическим деформированием материала. Подобного рода задачи решаются, используя процедуру анализа SolidWorks Simulation «Нелинейный – статический анализ» (рис. 5).

При проведении данного анализа необходимо задать соответствующие механические свойства материала и процедуру раскрытия нелинейности (рис. 6).

Наряду с этой информацией, необходимо указать температурное исследование, являющееся базовым для проведения нелинейного анализа (рис. 7).

Кроме этой информации, необходимо также задать сведения об используемой разрешающей программе и характеристиках пошагового метода раскрытия нелинейности (рис. 8).

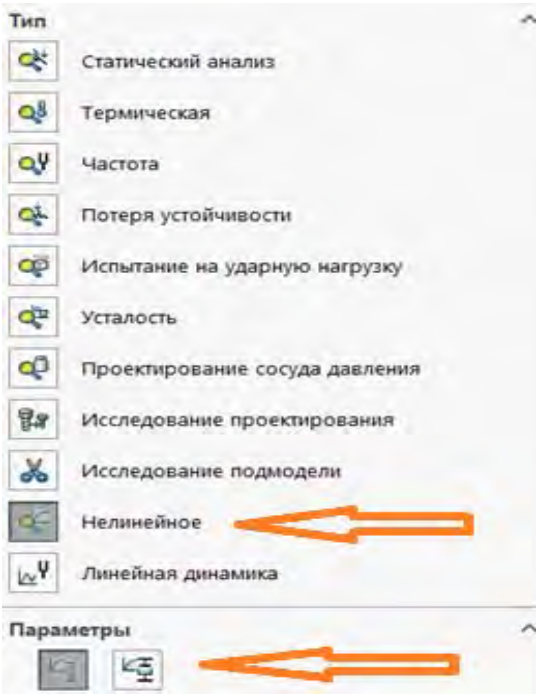


Рис. 5. Используемая процедура анализа SolidWorks Simulation

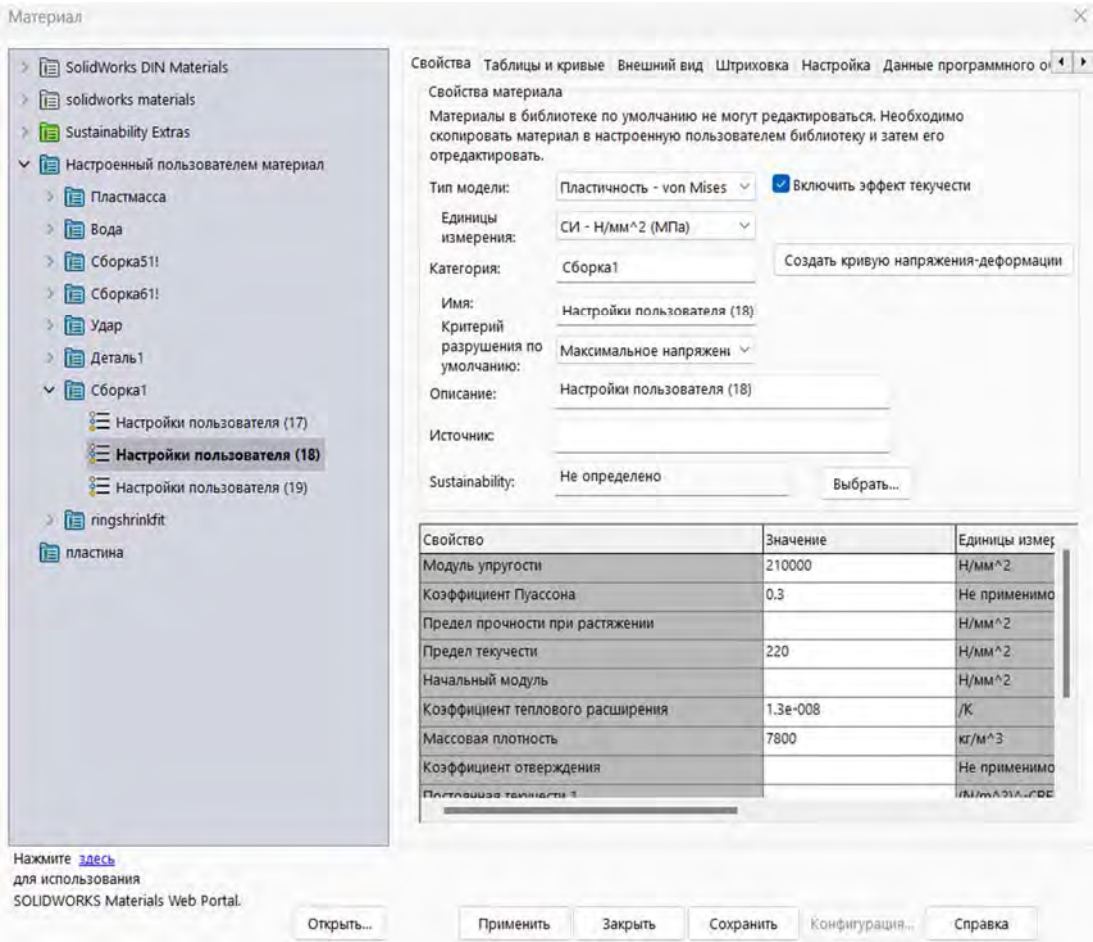


Рис. 6. Механические свойства материала и процедура раскрытия нелинейности

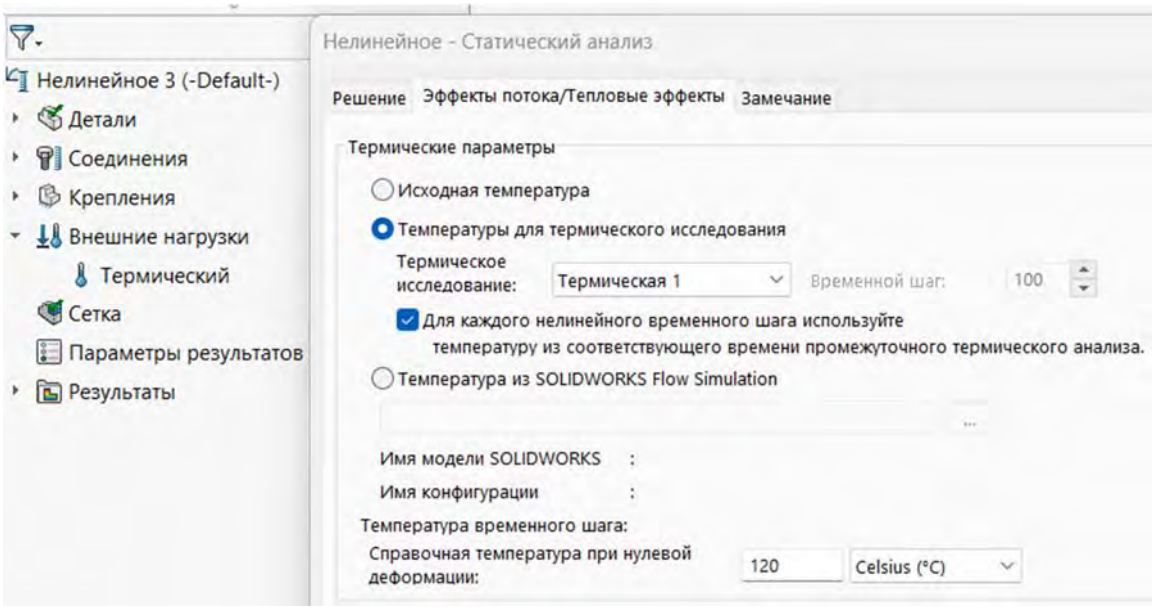


Рис. 7. Сведения об использовании базового температурного исследования

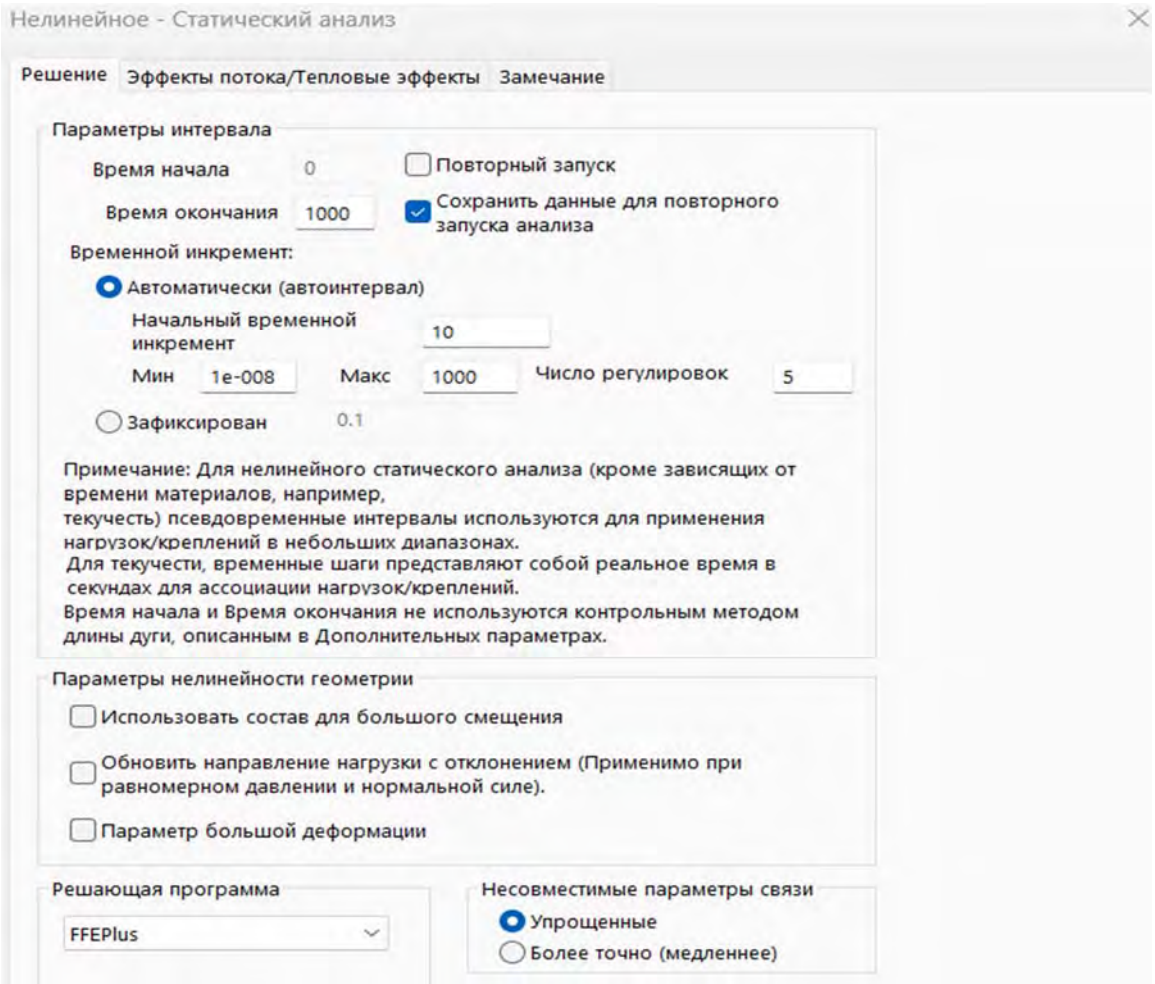


Рис. 8. Используемая разрешающая программа и характеристики пошагового метода раскрытия нелинейности

В дальнейшем была создана сетка конечно-элементной модели, полностью аналогичная той, которая использовалась при решении задачи в линейной постановке и при расчете тепловых процессов. Следует отметить, что продолжительность расчета совмещенной задачи «Нестационарное температурное поле» и «Нелинейное упругопластическое деформирование изделий соединения» значительно превышает время решения задачи в линейной постановке, поскольку, во-первых, используется пошаговый метод нагружения и, во-вторых, при наличии на шаге во времени упругопластического деформирования применяется итерационный процесс – *алгоритм Ньютона – Рафсона* (*NR*).

В результате проведенного анализа было получено распределение остаточных напряжений Von Mises по площади сечения соединения «полый вал – ступица», совпадающего с осью вращения (рис. 9).

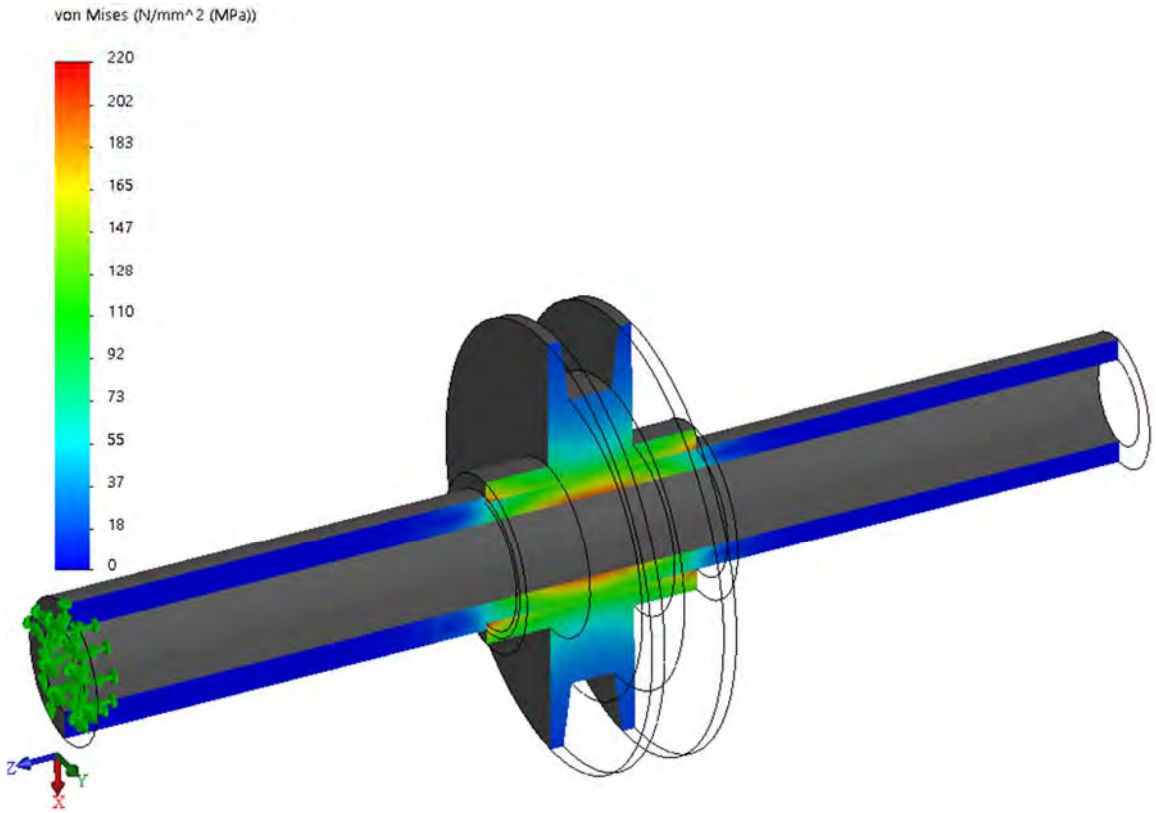


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений Von Mises по площади сечения соединения «полый вал – ступица», совпадающего с осью вращения

Сопоставление эпюр остаточных напряжений Von Mises, полученных в линейной постановке задачи, и с учетом реального процесса охлаждения соединения, а также упругопластического деформирования материалов деталей, входящих в сборку (см. рис. 9), показало, что во втором случае значения максимальных напряжений ниже и не превышают предела текучести материала 220 МПа. Следует иметь в виду, что процесс упругопластического деформирования материала в данном случае описывался с помощью идеализированной диаграммы Прандтля (рис. 10).

На рис. 11 приведено распределение радиальных остаточных напряжений $\sigma_r$ по площади сечения соединения «полый вал – ступица», совпадающего с осью вращения.

На рис. 12 представлена кинетика изменения во времени контактных давлений в зоне соприкосновения системы «полый вал – шкив».

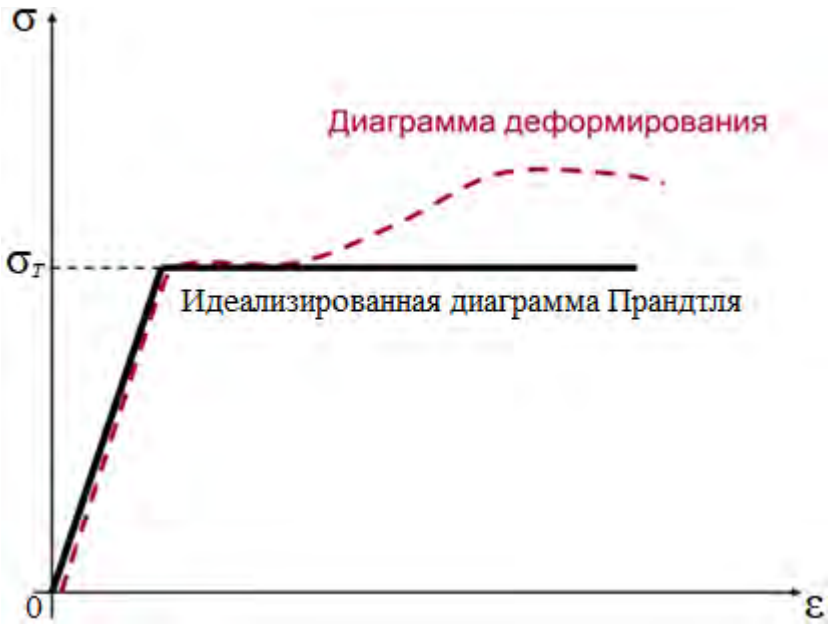


Рис. 10. Идеально упругопластическое тело

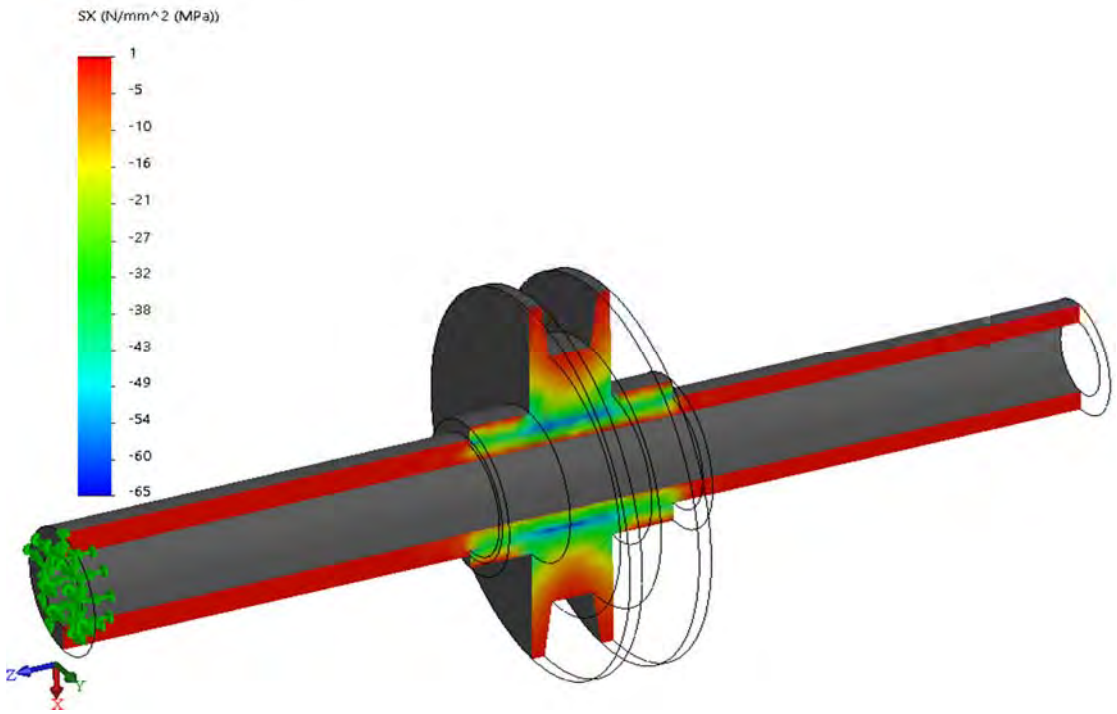


Рис. 11. Распределение радиальных остаточных напряжений $\sigma_r$ по площади сечения соединения «полый вал – ступица», совпадающего с осью вращения

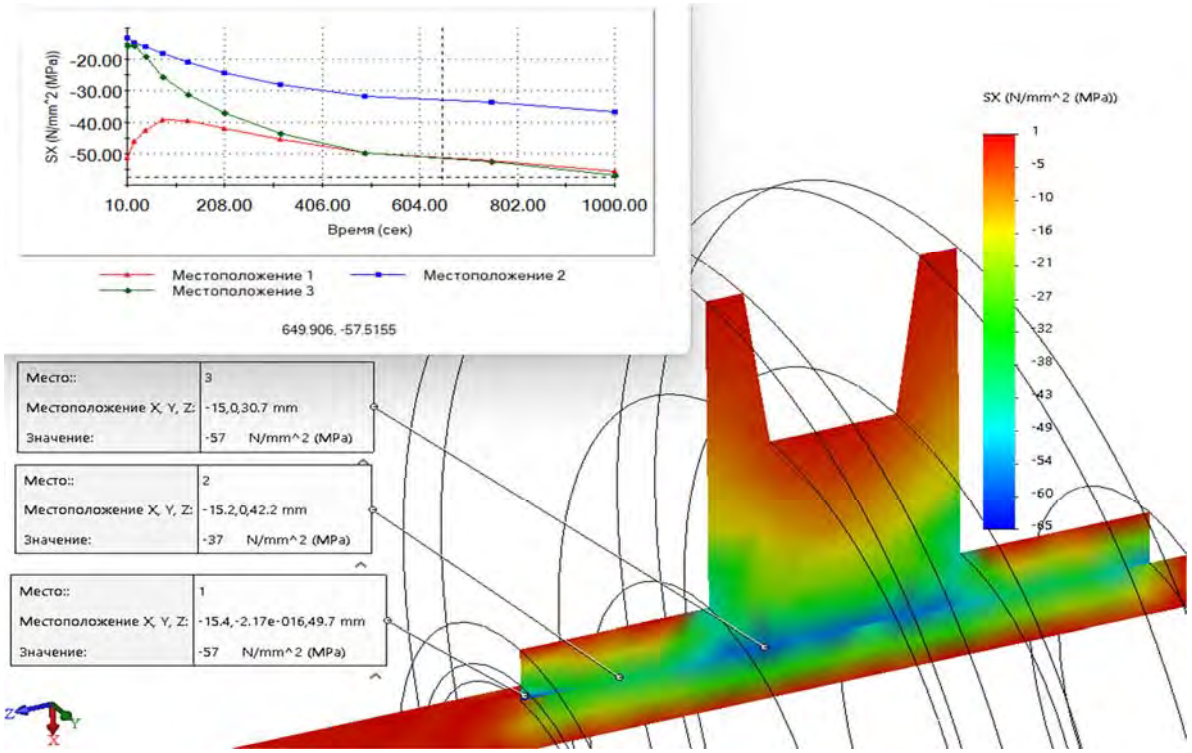


Рис. 12. Кинетика изменения во времени контактных давлений в зоне соприкосновения системы «полый вал – шкив»

### *Выводы*

По результатам проведенного численного имитационного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Разработана имитационная модель и проведен анализ нестационарного температурного поля, имеющего место при горячей посадке шкива на полый вал. В данной модели учтены: конвективный теплообмен с поверхности соединения в окружающую среду и теплопередача со шкива в полый вал.

2. Создана конечно-элементная модель горячей посадки ступицы на полый вал, предметом рассмотрения которой является совмещенная задача термоупругопластического деформирования изделия.

3. По результатам проведенного анализа установлены закономерности развития остаточных напряжений и факторы, оказывающие существенное влияние на образование контактных давлений в зоне соприкосновения системы «полый вал – шкив».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попковский, В. А.** Напряженно-деформированное состояние шкива и полого вала при использовании горячей посадки / В. А. Попковский, А. В. Альхимович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3. – С. 51–60.

*Статья сдана в редакцию 25 апреля 2025 года*

Контакты:
viktorpopkovski@mail.ru (Попковский Виктор Александрович);
llexa8787898@gmail.ru (Альхимович Алексей Викторович).

***V. A. POPKOVSKY, A. V. ALKHIMOVICH***

## ELASTOPLASTIC DEFORMATION DURING HOT FITTING A PULLEY ON A HOLLOW SHAFT

**Abstract**

The results of finite element simulation of the residual stress field formation during hot fitting a pulley on a hollow shaft are presented, taking into account nonlinearities caused by elastoplastic deformation and an unsteady temperature field.

**Keywords**:

computer modeling, finite element method, stress-strain state, hot fitting a pulley on a hollow shaft.

**For citation**:

Popkovsky, V. A. Elastoplastic deformation during hot fitting a pulley on a hollow shaft / V. A. Popkovsky, A. V. Alkhimovich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 2 (87). – P. 24–33.