

УДК 621.81

## Разработка методики расчета термонапряженного состояния инструмента для непрерывного прессования

Аборкин А.В., Захаров А.А., Жуков И.О.

В данной статье рассмотрена методика расчёта термонапряженного состояния инструмента для непрерывного прессования. Указан один из основных дефектов, лимитирующий долговечность инструмента, возникающий в процессе работы. Представленная методика нацелена на изучение термонапряженного состояния инструмента для прогнозирования мест возникновения трещин. Реализация методики проводится поэтапно с использованием имитационных моделей. Численная реализация имитационных моделей прессового инструмента выполнена с помощью программного комплекса ANSYS Workbench. Приведены примеры результатов расчета температуры и напряжений для инструмента, а также результаты эксперимента по определению температуры. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать разработанную методику для проектирования рациональных конструкций инструмента для непрерывного прессования.

*Ключевые слова:* непрерывное прессование, напряжения, метод конечных элементов, долговечность, прессовый инструмент.

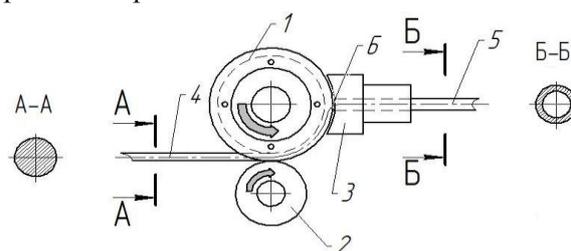
### Введение

Процесс непрерывного прессования со сваркой металла в очаге деформации (способ Конформ) относится к весьма перспективным способам получения тонкостенных полых профилей из алюминиевых сплавов, используемых в автомобильной, аэрокосмической, кабельной, холодильной и других отраслях промышленности. В отличие от других способов непрерывного прессования, основанных на использовании активных сил трения, способ Конформ имеет наиболее простую кинематическую схему, достаточно высокую технологическую гибкость за счет быстрой смены инструмента, обеспечивает более высокие скорости прессования, не требует предварительного нагрева заготовки.

Непрерывное прессование на установке Конформ обеспечивает высокое качество и точность геометрических размеров готовых изделий без дальнейшей их обработки, практически полное использование материала заготовки благодаря отсутствию пресс-остатка, существенное снижение капитальных вложений и расхода электроэнергии. Однако прак-

тическая реализация способа Конформ сдерживается недостаточной технологической разработкой процесса, обусловленной малой изученностью характера течения металла в очаге деформации, отсутствием обоснованных рекомендаций по силовым и температурным условиям прессования, низкой стойкостью инструментальной оснастки.

На рис. 1. показана схема процесса непрерывного прессования.



**Рис. 1.** Схема процесса непрерывного прессования:

- 1 - колесо; 2 - прижимной ролик; 3 - чехол;  
4 - заготовка; 5 - готовая продукция; 6 - упор.

Заготовка 4 подается в ручей, выполненный в рабочем колесе 1 и запрессовывается в него прижимным роликом 2. Под действием сил трения заготовка начинает двигаться вме-

сте с рабочим колесом 1 до упора 6. Дойдя до упора 6 заготовка 4 распрессовывается и интенсивно разогревается, проходя в чембер 3. Из чембера под действием давления прессуемый материал выходит через отверстие требуемого сечения в виде готовой продукции 5.

В процессе работы элементы инструментальной оснастки испытывают значительные тепловые и силовые воздействия, что ведет к преждевременному выходу их из строя, удорожая процесс.

Повышение долговечности инструментальной оснастки для непрерывного прессования является актуальной задачей, успешное решение которой будет способствовать повышению эффективности и ускорению промышленного освоения процесса.

Опыт эксплуатации показывает, что элементом инструментальной оснастки, лимитирующим долговечность системы является колесо. Для него характерен выход из строя вследствие образования трещин в зоне каналов под охлаждение и основания шлицев. На рис. 2 представлены трехмерная модель колеса и фотографии расположения трещин, появившихся в процессе эксплуатации.

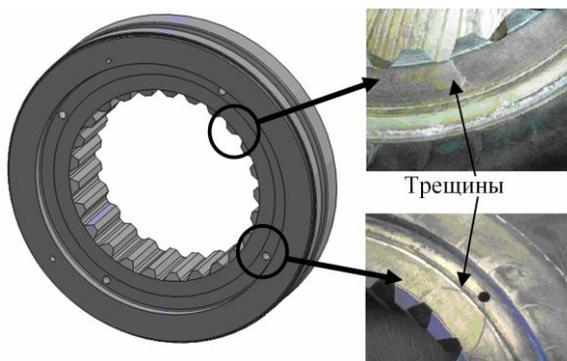


Рис. 2. Объект исследования - колесо для непрерывного прессования.

По данным работ [1-2] управление величиной и характером распределения напряжений в инструментальной оснастке для обработки металлов давлением возможно посредством применения рациональной схемы охлаждения. Выбор рациональной схемы охлаждения, позволяющей обеспечить тепло-

вое поле не вызывающее на поверхностях оснастки опасных температурных напряжений, является одним из основных способов увеличения ресурса высоконагруженного инструмента.

Целью данной работы состоит в разработке методики расчета термонапряженного состояния инструмента для непрерывного прессования и проверки ее достоверности.

### Методика расчета

В основу методики положен алгоритм вычислений, предложенный в работе [3].

Методика сводится к вычислению параметров модели и осуществляется поэтапно.

**I этап.** Подготовка исходных данных для расчетов.

**II этап.** Моделирование изменения температурного поля колеса при выходе на рабочий режим.

**III этап.** Расчет эксплуатационных напряжений.

Подготовка исходных данных для расчета на **I этапе** состояла в создании трехмерной модели (3D-модель) и конечноэлементной модели колеса для непрерывного прессования, определении цикла его нагружения, задании физико-механических характеристик материала, а также назначении граничных условий.

Для построения 3D-модели по чертежу использовали систему автоматизированного проектирования Pro/Engineer WildFire4.

При построении конечноэлементной модели колеса использовали программный комплекс ANSYS Workbench. Для получения низкой расчетной погрешности проводили сгущение сетки для зон резкого изменения геометрии - отверстий и шлицев. При определении теплового состояния колеса использовали 10-узловой изопараметрический конечный элемент в виде тетраэдра, что позволило наиболее точно описать распределение температуры и перемещений в узловых точках конечноэлементной модели колеса.

В реальных условиях работы колесо испытывает переменные температурные нагрузки, поэтому при расчетах необходимо циклическое изменение граничных условий на его поверхности в виде цикла нагружения, который эквивалентен условиям его работы. При эксплуатации нагрев колеса осуществляется за счёт теплового потока идущего от чембера нагретого до 450°С. Так как поверхность чембера, обращенная к колесу, составляет 1/6 часть площади последнего, при расчетах принята схематизация процесса тепловложения, заключающаяся в делении колеса на 6 частей. На каждую из частей последовательно воздействует тепловой поток. Таким образом, цикл - представляющий собой 1 оборот колеса состоит из этапа «нагрев» реализуемого при прохождении чембера и занимающего 1/6 времени оборота и этапа «охлаждение» под действием естественной и вынужденной конвекции занимающего 5/6 времени оборота. Схематическое изображение цикла нагрева поверхности колеса приведено на рис. 3.

Теплофизические свойства материала колеса и их зависимость от температуры определяли по справочным данным.

В качестве основных граничных условий, описывающих тепловое взаимодействие поверхностей колеса и окружающей среды, использовали условия II и III рода.

Плотность теплового потока  $q$ , проходящего через поверхность колеса описывали с помощью выражения:

$$q = -\lambda \partial T(x, y, z) / \partial n,$$

где  $n$  – нормаль к поверхности в точке с координатами  $x, y$  и  $z$ ;  $\lambda$  – теплопроводность материала конструкции;  $q$  – плотность теплового потока.

Условие теплообмена с окружающей средой имело вид:

$$-\lambda \left[ \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial n} \right] = \alpha(T - T_{\infty}),$$

где  $T_{\infty}$  – температура окружающей среды;  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности колеса, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Для определения численного значения величины теплового потока использовали выражение [4]:

$$q = 0,78f \cdot \frac{\left[ \frac{T}{100} - 110 \right]}{l^2},$$

где  $f$  – площадь излучающей поверхности, м<sup>2</sup>;  $T$  – температура излучающей поверхности, К;  $l$  – расстояние от излучающей поверхности, м.

Величины коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha$  для поверхностей колеса контактирующих с водой определяли согласно выражению [5]:

$$\alpha = A \frac{(\omega\gamma)^{0,8}}{D^{0,2}},$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды;  $\omega$  – скорость истечения воды;  $D$  – внутренний диаметр канала для охлаждения;  $A$  – комплекс, значение которого зависит от температуры.

При вычислении эксплуатационных напряжений использовали статические и кинематические граничные условия.

Таким образом, выполнение первого этапа методики позволило перейти к решению нестационарной задачи теплопроводности.

Задачей **II этапа** являлось вычисление температуры колеса за цикл нагружения. Для вычисления температуры рассматривали систему дифференциальных уравнений метода конечных элементов, записанных в форме

$$[C] \frac{d\{T\}}{dt} + [K]\{T\} + \{F\} = 0,$$

где  $[C]$  – матрица теплоемкости;  $[K]$  – матрица теплопроводности;  $\{F\}$  – вектор тепловой нагрузки.

При определении показателей напряженно-деформированного состояния колеса на **III этапе** учитывали действие температурных нагрузок и усилия, возникающие в процессе запрессовки заготовки в ручей колеса.

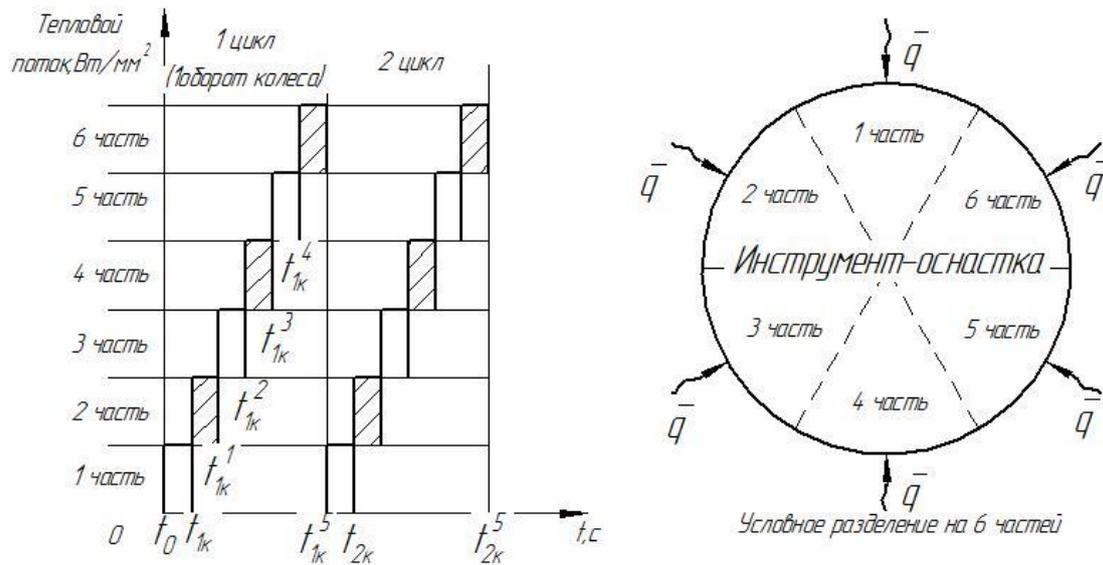


Рис. 3. Схематическое изображение цикла нагрева поверхности колеса.

Вычисление напряжения в узлах сеточной области проводили на основе упругой модели сплошной среды. При использовании метода конечных элементов решается система линейных уравнений, которая в матричной форме имеет вид

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{\Omega}\},$$

где  $[\mathbf{K}]$  – матрица жесткости;  $\{\mathbf{U}\}$  – вектор компонентов узловых перемещений;  $\{\mathbf{\Omega}\}$  – вектор нагрузки.

Для проверки достоверности предложенной методики выполнены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния колеса для установки Конформ-350. Колесо изготовлено из инструментальной штамповой стали Н13 (аналог стали 4Х5МФСА). Максимальный диаметр колеса – 350 мм, внутренний диаметр – 275 мм.

Расчеты были выполнены для варианта исполнения колеса с четырьмя каналами охлаждения диаметром шесть миллиметров.

Конечноэлементная модель колеса состояла из 129199 узлов и 76759 элементов, что позволило с высокой точностью описать ее геометрию и получить низкую расчетную погрешность.

Проверку достоверности результатов расчета температуры проводили сравнением рас-

четных и экспериментальных данных. Экспериментальное исследование изменения температуры колеса при выходе на эксплуатационный режим проводили с помощью термометрирования.

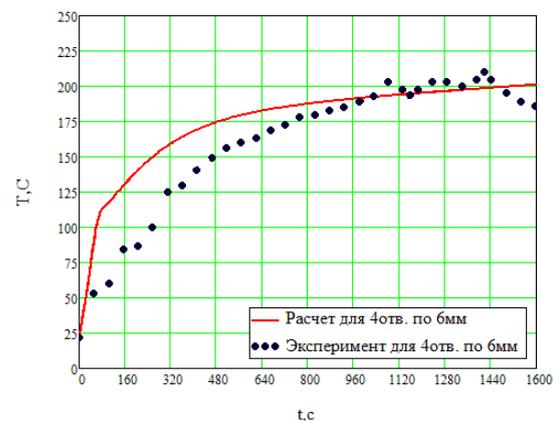


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

На рис. 4 приведены кривые, полученные в результате расчетов, а также экспериментальные данные.

В результате сравнения расчетных и экспериментальных данных установлено их хорошее соответствие при выходе на рабочий режим, что позволило говорить о корректности принятых граничных условий, правомерности выбранных методов расчетов и принятых допущений.

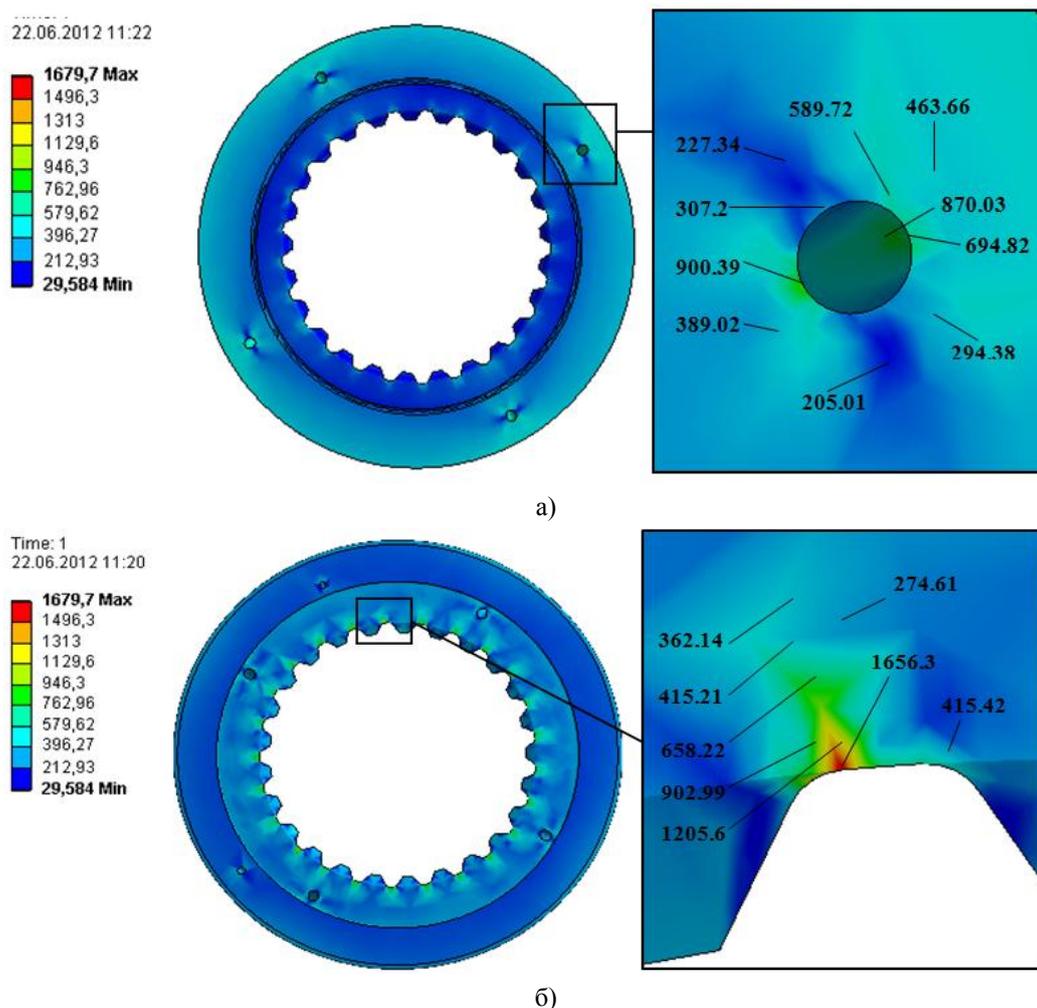


Рис. 5. Концентрация напряжений в зоне каналов под охлаждение (а) и основания шлицев (б).

Полученные результаты позволили перейти к вычислению напряжений.

Полученные данные об изменении теплового состояния колеса при непрерывном прессовании были использованы в качестве исходных при расчете напряженно-деформированного состояния.

На рис. 5 показаны расчетные картины распределения эквивалентных напряжений в колесе при выходе на рабочий режим.

Анализ распределения температурных напряжений показал их неравномерность. Концентрация напряжений наблюдается в зонах впадин шлицев и каналов под охлаждение, что хорошо согласуется с фактическими данными по образованию трещин (см. рис.2)

### Заключение

Таким образом, полученные расчетные данные и их соответствие результатам эксперимента позволяет рекомендовать разработанную методику для проектирования рациональных конструкций инструмента для непрерывного прессования.

В настоящее время авторы проводят исследования направленные на совершенствование конструкции рабочего колеса, отвечающей условию возникновения наименьших напряжений.

### Литература

1. Белевич А.В. Моделирование температурного режима и усовершенствование конструкции тяжело нагруженного направляющего инструмента прошивного стана. / А. В. Белевич

левич [и др.] // Производство проката, 2006, № 9. - С. 23-27.

2. *Белевич А.В.* Повышение эффективности горячего прессования на основе совершенствования формоизменения, условий эксплуатации и проектирования инструмента для освоения серийного выпуска точных стальных профилей в машиностроении. Дисс. докт. техн. наук. - Москва, МИСиС. 2000. - 320 с.

3. *Белевич А. В.* Моделирование термонапряженного состояния потенциально опасных промышленных объектов / А. В. Белевич, А. В. Аборкин [и др.] // Безопасность труда в промышленности, 2007, №3. – С.37 – 39.

4. ГОСТ 12.4.045 - 87. СБТ. Средства защиты от инфракрасного излучения. Классификация. Общие технические требования. - Госстандарт СССР, 1983. 19 с.

5. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. - Л.: Военно-морская академия кораблестроения и вооружения им. А.Н. Крылова, 1954.

## References

1. *Belevich A.V.* Simulation of temperature and heavy duty design improvement tool guide piercing mill // Production of rolled, 2006, № 9. – P. 23-27.

2. *Belevich A.V.* Improving the efficiency of hot press forming by improving, operating conditions and design tool for the development of mass production of precision steel profiles in engineering. Diss. doctor. tech. science. Moscow, MISA. 2000. – 320 p.

3. *Belevich A.V.* Modelling thermally stressed condition of potentially hazardous industrial facilities // Security of labor in the industry, 2007, № 3. – P. 37-39.

4. GOST 12.4.045 - 87. «SSBT. Means of protection against infrared radiation. Classification. General requirements. - State Standard of the USSR, 1983. – 19 p.

5. *Kutateladze S.S.* Fundamentals of the theory of heat transfer. – L.: Naval Academy shipbuilding and weapons of A.N. Krylov, 1954.

**Статья поступила в редакцию 29 сентября 2012 г.**

In this paper considers method of calculating the thermal stress state of the tool for continuous pressing. Set one of the major defects, limiting the durability of the tool that occurs during operation. The presented method focuses on the study of the thermal stress state in order to forecast locations of cracks. Realization techniques in stages using simulation models. Numerical realization of simulation models pressing tool made through software package ANSYS Workbench. The examples of the results of calculation of temperature and pressure for the tool, and the results of an experiment to determine the temperature. A comparison of the calculated and experimental values of the temperature. The good agreement between the calculated and experimental data. This fact allows us to recommend the methodology developed for the design of rational design tool for continuous pressing.

*Keywords:* continuous pressing, stress, finite element method, durability, pressing tools.

*Аборкин Артемий Витальевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*Захаров Александр Андреевич* – ассистент кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

*Жуков Илья Олегович* – студент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»