

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ

*Носов Н.В., Якубович Е.А.*

*Самарский государственный технический университет, Самара, Россия*

**Ключевые слова:** объемная штамповка, буровое долото, лапа долота, конечно-элементное моделирование, гравюра штампа, упругие напряжения, интенсивность напряжений, приспособляемость, температурно-силовое нагружение, ANSYS.

**Аннотация.** В статье приводятся результаты моделирования температурно-напряженного состояния сложных штампов при штамповке элементов буровых шарошечных долот с гарантированными прочностными параметрами на основе учета особенностей процесса формообразования и применения теории приспособляемости. С применением предложенной методики конечно-элементного моделирования процесса штамповки проанализировано распределение термоупругих напряжений в формообразующем инструменте, что позволяет на стадии проектирования оптимизировать геометрические параметры гравюры штампа и произвести обоснованный выбор штамповой стали с учетом изменяемых силовых и температурных режимов эксплуатации.

## SIMULATION OF FORGING PROCESS BASED ON THE THEORY OF ADAPTABILITY

*Nosov N.V., Yakubovich E.A.*

*Samara state technical university, Samara, Russia*

**Keywords:** forging, drill bit, bit paw, finite element modeling, die engraving, elastic stresses, stress intensity, adaptability, temperature-force loading, ANSYS.

**Abstract.** The article presents the results of modeling the temperature-stressed state of complex dies during the stamping of elements of roller cone bits with guaranteed strength parameters based on the features of the shaping process and the application of the theory of adaptability. Using the proposed method of finite element modeling of the stamping process, the distribution of thermoelastic stresses in the shaping tool was determined, which makes it possible at the design stage to optimize the geometric parameters of the stamp engraving and make a reasonable choice of die steel, taking into account the variable power and temperature operating modes.

При проектировании оснастки для изготовления заготовок буровых шарошечных долот применяются, в основном, расчетные методы определения нагрузок, основанные на классической теории упругости. В этом случае нагрузки определяются в отдельных точках, без учета реальной геометрии формообразующего инструмента, нелинейного поведения свойств материалов исследуемых заготовок, особенно при больших деформациях, возникающих в процессе штамповки.

В работе предложено использовать метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет производить компьютерный анализ нагружения и расчет напряжений и деформаций сложных пространственных конструкций, обеспечивает высокую степень автоматизации построения моделей [1]. Особенность применения данного метода связана с новым подходом к оценке

циклической несущей способности штампов для объемной штамповки на основе теории приспособляемости, при реализации которого исследуются условия возникновения после одного или нескольких циклов температурно-силового нагружения такого поля остаточных напряжений, что последующие циклы нагружения вызывают только упругую деформацию [2].

Последовательность линейных конечно-элементных решений строится путем подбора полей фиктивных остаточных напряжений  $\sigma'_{ij}$ , соответствующих возможно большей области приспособляемости. С этой целью на каждой итерации корректируются значения модулей упругости  $E_i$  в каждом из конечных элементов. Сокращение времени решения происходит за счет применения итерационного метода, состоящего в последовательном решении ряда линейных задач вместо пошагового решения на каждом цикле нагружения.

Для оценки границ приспособляемости использовалась статическая теорема Мелана для случая одновременных тепловых и механических нагружений [3], в соответствии с которой приспособляемость в идеальном упругопластическом теле наступает, когда не зависящее от времени, поле суммарных напряжений  $\sigma^*_{ij}$  находится внутри полей текучести.

Внешние усилия, при которых суммарные и остаточные напряжения  $\sigma^*_{ij}$  и  $\sigma'_{ij}$  достигают предела текучести, обозначаются соответственно через  $Q_m^*$  и  $Q'_m$ . Меньшее из этих усилий является оценкой границы приспособляемости на данной итерации:  $Q_m = \min(Q_m^*, Q'_m)$ . Окончательная оценка отвечает условию  $Q = \max_m(Q_m)$ . Она достигается на той итерации, где нагрузки  $Q_m^*$  и  $Q'_m$  оказываются наиболее близкими друг к другу.

Для практического решения задачи определения циклической несущей способности элементов гравюры штампа заготовки лапы бурового долота применялась двухшаговая численная процедура конечно-элементного моделирования, согласно которой процесс штамповки сначала моделируется без учёта зависимости между тепловыми и механическими нагрузками.

При этом нижняя половинка штампа рассматривалась как абсолютно жёсткое тело, верхняя – как упругое тело, а заготовка имела термовязкоупругое поведение. Затем тепловые и другие поля напряжений в верхней половинке штампа рассчитывались с точностью, необходимой для решения задачи приспособляемости с применением пакета ANSYS. Геометрическая модель штампа строилась в CAD-системе Unigraphics, а затем передавалась непосредственно в ANSYS [4,5]. Анализ распределения напряжений и температур по поверхности гравюры и в сечениях штампа проводился на основе построения соответствующих изолиний.

Указанный подход реализован для совершенствования технологии автоматизированного проектирования штамповой оснастки при производстве лап буровых долот [6, 7] с использованием результатов определения

напряженно-деформированного состояния при запрессовке твердосплавных элементов вооружения шарошки бурового долота [8]. При моделировании процесса взаимодействия контактных поверхностей между инструментом и заготовкой учитывались три аспекта: контактные напряжения, изменение коэффициента трения и коэффициент теплопередачи. Для описания процесса трения принимался закон трения Кулона. Эквивалентное касательное напряжение рассчитывалось в соответствии с условием текучести Треска

$$|\tau| = \mu \sigma_n \text{ при } \mu \sigma_n < m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}; \quad |\tau| = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \text{ при } \mu \sigma_n \geq m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}.$$

Здесь  $\mu$  – коэффициент трения скольжения,  $m$  – коэффициент касательных напряжений,  $\sigma_0$  – предел текучести,  $\sigma_n$  – нормальное напряжение на контактной поверхности.

Методика расчета предусматривала двухуровневое решение. Сначала гравюра верхней половины штампа (рис. 1) моделировалась с использованием относительно грубой конечно-элементной сетки. Затем на наиболее нагруженной части штампа изменялась модель, в которой использовалась достаточно мелкая сетка.

Размер мелкой сетки подбирался таким образом, чтобы обеспечить достаточную точность аппроксимации градиента температур в приповерхностных слоях инструмента (рис. 2).

Решение задачи теплопроводности выполнялось для циклических условий нагружения, соответствующих реальным режимам процесса штамповки с использованием схематизированных диаграмм деформирования стали 5ХНМ. Изменение температуры определялось в точке пересечения поперечного и продольного сечений, выбранной на наиболее нагруженной поверхности гравюры при последовательной штамповке нескольких заготовок. Исследования показали, что разница температур при штамповке 3 и 4 заготовки составляет менее 5%, что позволяет считать температурный цикл установившимся.

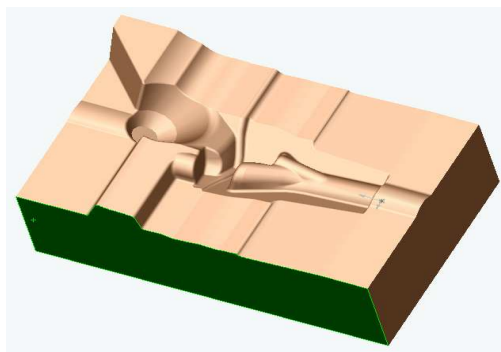


Рис. 1. 3D модель верхней половины штампа

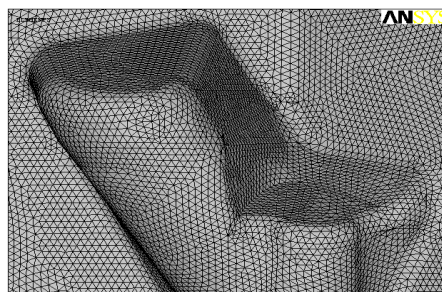


Рис. 2. Участок конечно-элементной сетки наиболее нагруженной части инструмента

Расчет полей упругих напряжений производился для двух моментов времени: при третьем и четвертом ударе (рис. 3). Затем они складывались из температурных напряжений и напряжений от усилий со стороны заготовки в наиболее нагретой точке в пределах базовой геометрии. Результаты анализа показали, что в наиболее нагруженных областях упругие напряжения, вызванные температурным градиентом, составляют до 90% от общих напряжений.

В соответствии с выбранными границами приспособляемости был выполнен прямой пошаговый расчёт напряжённо-деформированного состояния верхней половинки штампа при штамповке заготовки с температурой нагрева 1100°C и 1200°C.

Оценка снизу границы приспособляемости проводилась по следующему условию

$$\left| \sigma'_{ij} + \bar{\sigma}_{ij} \right| < \sigma_T, \quad (1)$$

где  $\sigma'_{ij}$  – поле остаточных напряжений после третьего удара при штамповке первой заготовки;  $\bar{\sigma}_{ij}$  – поле упругих напряжений во время третьего удара при штамповке третьей заготовки, когда достигается установившееся циклическое температурное состояние;  $\sigma_T$  – предел текучести соответствует температуре в момент третьего удара.

Прямыми скобками показано вычисление интенсивности напряжений, которые соответствуют температуре в момент третьего удара при штамповке третьей заготовки.

Выполнение условия (1) означает, что приспособляемость имеет место. Проведённые расчёты для интервала температур заготовки от 1100°C до 1200°C показали, что для верхней границы интервала при повышении интенсивности напряжений в левой части (1) превышает предел текучести на 24%, а при температуре заготовки 1100°C – ниже его на 5,7% (рис. 3).

Как видно из графика, снижение температуры заготовки на 100°C приводит к значительному и практически равномерному снижению интенсивности упругих напряжений в приповерхностных слоях штампа примерно на 50-60%, что несомненно должно способствовать повышению стойкости штампов.

Снижение интенсивности термоупругих напряжений на поверхности гравюры может быть также достигнуто за счёт изменения её геометрической формы и улучшения условий отвода тепла от поверхности.

Установлено, что наибольшее влияние на условие отвода тепла из зоны деформации на 50-70% оказывает изменение геометрии гравюры по сравнению с базовой за счет увеличения радиусов сопряжений поверхностей.

Произведен анализ напряженно-деформированного состояния гравюры штампов с измененной геометрией при температуре заготовки в 1200°C по предложенной методике. Исследования показали, что превышение левой части уравнения (1) над правой, составило примерно 3-8%.

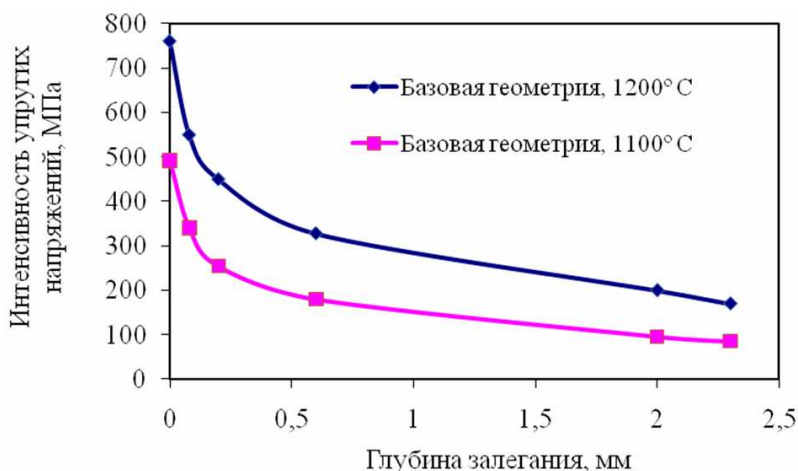


Рис. 3. Интенсивность упругих напряжений и их глубина залегания в наиболее нагретой точке при штамповке третьей заготовки (третий удар)

Результаты исследования интенсивности упругих напряжений от глубины залегания при изменении базовой геометрии штампа (увеличение радиусов скругления на 50-70 %) приведены на рисунке 4. Как видно из графика, изменение радиусов скругления приводит к перераспределению напряжений за счет существенного их снижения на поверхности (с 761 МПа до 517 МПа) и незначительного роста в глубине штампа (с 170 МПа до 193 МПа).

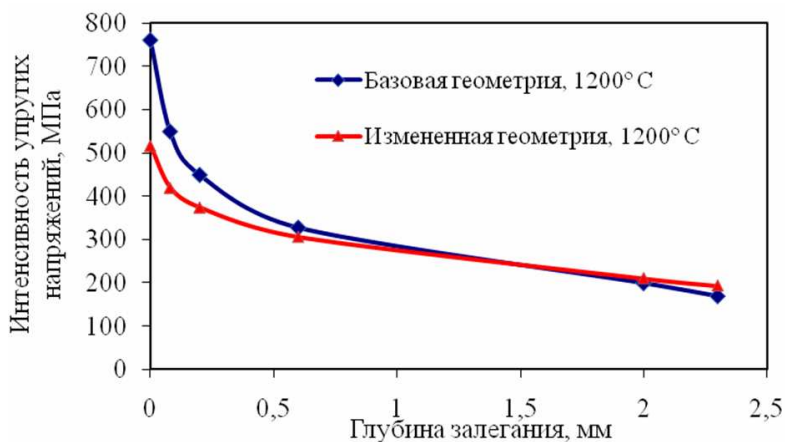


Рис. 4. Влияние изменения геометрии гравюры штампа на интенсивность упругих напряжений и глубину их залегания в наиболее нагретой точке при штамповке третьей заготовки (третий удар)

Исследования показали, что температура на поверхности в наиболее нагретой точке уменьшается на 94°C, а на глубине практически остается неизменной (увеличение на 5°C).

Таким образом, предложенный подход позволяет количественно оценивать влияние геометрии на увеличение сопротивления смятию гравюры штампа при объемной штамповке.

В работе выполнено сравнение особенностей применения сталей марок 5ХНМ и 5Х2НМФ для штампов при производстве лап буровых долот. Расчеты показывают, что применение стали 5Х2НМФ практически не повлияло на распределение полей температур, а циклические напряжения оказались полностью в упругой области. Показано, что применение стали 5Х2НМФ существенно (на 90°С и более) снижает температуру в наиболее напряженных зонах гравюры и до 60% интенсивность внутренних напряжений в поверхностных слоях.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. С целью совершенствования технология проектирования сложных штампов с гарантированными прочностными параметрами выполнено моделирование температурно-напряженного состояния штампа с учетом особенностей эксплуатации и применения теории приспособляемости.

2. Предложена методика конечно-элементного моделирования процесса штамповки, позволяющая оценивать влияние параметров нагрева заготовки и геометрических характеристик гравюры штампа на интенсивность и распределение упругих напряжений.

3. Показано, что применение стали 5Х2НМФ для штампов с целью изготовления лапы бурового долота существенно (на 90°С и более) снижает температуру в наиболее напряженных зонах гравюры и до 60% интенсивность внутренних напряжений в поверхностных слоях инструмента.

### **Список литературы**

1. Чернявский О.Ф. Метод конечных элементов в задачах предельного равновесия и приспособляемости пластин и оболочек // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Физика. Химия». – 2003. – Вып. 4. – № 8 (24). – С.107-111.
2. Гохфельд Д.А. Приспособляемость упруго-пластических конструкций / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский // Проблемы теории пластичности и ползучести. – М.: Мир, 1979. – С. 7-53.
3. Гохфельд Д.А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен. – М.: Машиностроение, 1970. – 259 с.
4. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
5. Cai C. Modeling of Material Damping Properties in ANSYS / C. Cai, H. Zheng, M.S. Khan and K.C. Hung // CADFEM Users Meeting & ANSYS Conference, Friedrichshafen, Germany, 2002.
6. Носов Н.В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / Н.В. Носов, А.А. Черепашков. – Волгоград: Изд. дом «Ин-Фолио», 2009. – 640 с.
7. Богомоллов Р.М. Совершенствование технологии автоматизированного проектирования и изготовления штамповой оснастки для выпуска лап

буровых долот / Р.М. Богомолов, М.В.Гавриленко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – №6. – С.28-34.

8. Кремлев, В.И. Исследование напряженно-деформированного состояния при запрессовке твердосплавных элементов вооружения шарошки бурового долота / В.И. Кремлев, Н.В. Носов, Р.М. Богомолов, Л.В. Морозов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2005. – Вып.9. – С.234-238.

### References

1. Chernyavsky O.F. Finite element method in problems of limit equilibrium and adaptability of plates and shells // Bulletin of SUSU. Series "Mathematics. Physics. Chemistry". – 2003. – Issue.4. – No.8 (24). – P. 107-111.
2. Gokhfeld D.A. Adaptability of elastic-plastic structures / D.A. Gokhfeld, O.F. Chernyavsky // Problems of the theory of plasticity and creep. – M.: World, 1979. – P. 753.
3. Gokhfeld D.A. Bearing capacity of structures in conditions of heat change. – M.: Mechanical Engineering, 1970. – 259 p.
4. Kaplun A.B. ANSYS in the hands of an engineer: practical guidance / A.B. Kaplun, E.M. Morozov, M.A. Olferyeva. – M.: Editorial URSS, 2003. – 272 p.
5. Cai C. Modeling of Material Damping Properties in ANSYS / C. Cai, H. Zheng, M.S. Khan and K.C. Hung // CADFEM Users Meeting & ANSYS Conference, Friedrichshafen, Germany, 2002.
6. Nosov N.V. Computer technologies, modeling and automated systems in mechanical engineering / N.V. Nosov, A.A. Cherepashkov. – Volgograd: Publ. House "In-Folio", 2009. – 640 p.
7. Bogomolov R.M. Improving the technology of computer-aided design and manufacturing of stamp equipment for the production of paws of drilling bits / R.M. Bogomolov, M.V. Gavrilenko // Procurement production in mechanical engineering. – 2004. – No.6. – P. 28-34.
8. Kremlev V.I. Investigation of the stress-strain state during the pressing of hard-alloy elements of the cutting structure of the drill bit / V.I. Kremlev, N.V. Nosov, R.M. Bogomolov, L.V. Morozov // Bulletin of SamSTU. Series "Technical Sciences". – 2005. – Issue 9. – P. 234-238.

<b>Носов Николай Васильевич</b> – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»	<b>Nosov Nikolay Vasilevich</b> – doctor of technical science, professor, Department «Mechanical engineering technology, machine tools and tools»
<b>Якубович Ефим Абрамович</b> – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» eyakubovich@mail.ru	<b>Yakubovich Efim Abramovich</b> – candidate of technical science, professor, Department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials»

*Received 24.01.2022*