

УДК 621.45.01:004.945

Н. В. Носов, д-р техн. наук, проф.

Самарский государственный технический университет, Россия

Тел. / Факс: 8 (846) 332-10-90; E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ШТАМПОВ

В статье приводятся результаты проектирования сложных штампов при изготовлении заготовок буровых шарошечных долот с гарантированными прочностными параметрами на основе моделирования процесса их эксплуатации и применения теории приспособляемости без проведения длительных и дорогостоящих натурных экспериментов, а также методика конечно-элементного моделирования процесса штамповки, которые на стадии проектирования позволяют оптимизировать модели штампов с учетом изменяемых силовых и температурных режимов эксплуатации, геометрических параметров гравюры и выбора материала.

Ключевые слова: лапа шарошки, конечно-элементная модель, оптимизация, режимы штамповки, сквозное проектирование, CAD/CAM/CAE – технологии.

N.V. Nosov

APPLICATION OF THE THEORY OF ADAPTABILITY IN THE DESIGN OF COMPLEX DIES

The article presents the results of designing complex dies in the manufacture of drill blanks with guaranteed strength parameters based on modeling the process of their operation and the application of the theory of adaptability without long and expensive field experiments, as well as the technique of finite element modeling of the stamping process, which at the design stage allow you to optimize the stamp models taking into account the variable power and temperature operating conditions, geometric parameters of the engraving and the choice of material.

Keywords: ball foot, finite element model, optimization, stamping modes, end-to-end design, CAD/CAM/CAE technologies.

Введение

До недавнего времени при проектировании оснастки для изготовления заготовок буровых шарошечных долот применялись, в основном, расчетные методы определения нагрузок, основанные на классической теории упругости. В этом случае нагрузки определялись в отдельных точках, без учета реальной геометрии, 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]. Особенностью применения данного метода связано с новым подходом к оценке циклической несущей способности штампов, который основан на теории приспособляемости с применением упругих компенсаций [2].

Последовательность линейных конечно-элементных решений строится путем подбора полей фиктивных остаточных напряжений σ'_{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.

Методика исследования

Для оценки границ приспособляемости использовалась статическая теорема Мелана [3], в соответствии с которой приспособляемость в идеальном упругопластическом теле наступает, когда не зависящее от времени, поле суммарных напряжений σ^*_{ij} находится внутри полей текучести.

Внешние усилия, при которых рабочие напряжения σ^*_{ij} и σ'_{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 – это величина $Q = \max_m(Q_m)$. 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 термо-вязко-упругое 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]. Анализ распределения напряжений и температур по поверхности гравюры и в сечениях штампа проводился на основе построения соответствующих изолиний.

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

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

где μ - коэффициент трения скольжения, m - коэффициент касательных напряжений, σ_o - предел текучести, σ_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.

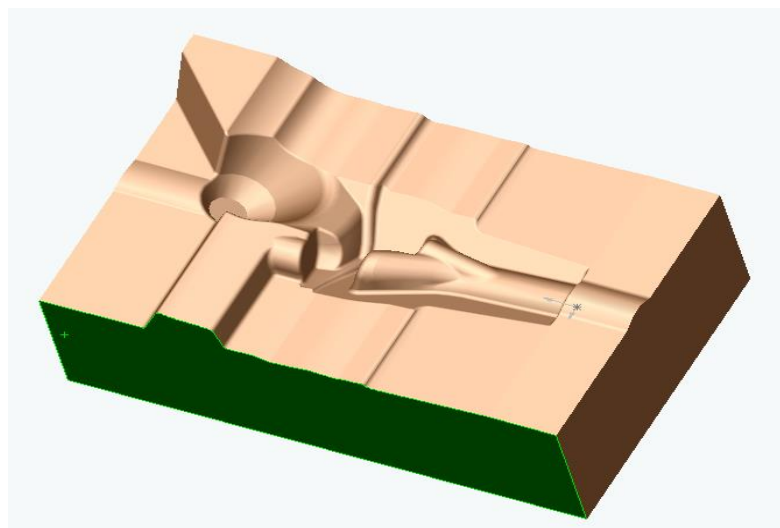


Рисунок 1. 3-D модель верхней половины штампа.

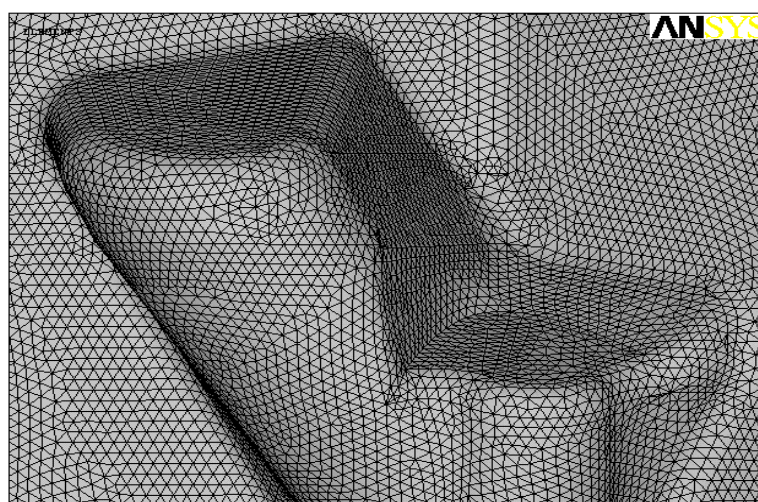


Рисунок 2. Участок конечно-элементной сетки наиболее нагруженной части инструмента.

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.

Расчет полей упругих напряжений производился для двух моментов времени: при третьем и четвертом ударе. 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

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

где σ'_{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; σ_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).

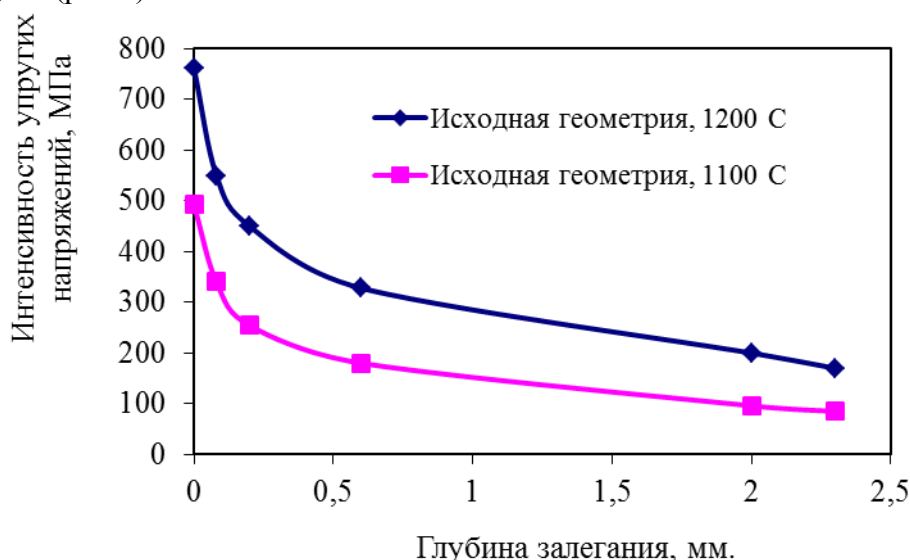


Рисунок 3. Интенсивность упругих напряжений и их глубина залегания в наиболее нагретой точке при штамповке третьей заготовки (третий удар) с учетом температуры заготовки

Результаты и обсуждение

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 (50-70%) оказывает увеличение радиусов сопряжений поверхностей.

Произведен анализ напряженно-деформированного состояния гравюры штампов с измененной геометрией при температуре заготовки в 1200°C по предложенной мето-

дике. Исследования показали, что превышение левой части уравнения (1) над правой, составило примерно 3-8%.

Результаты исследования интенсивности упругих напряжений от глубины залегания при изменении геометрии штампа (увеличении радиусов скругления на 50-70%) приведены на рис. 4.

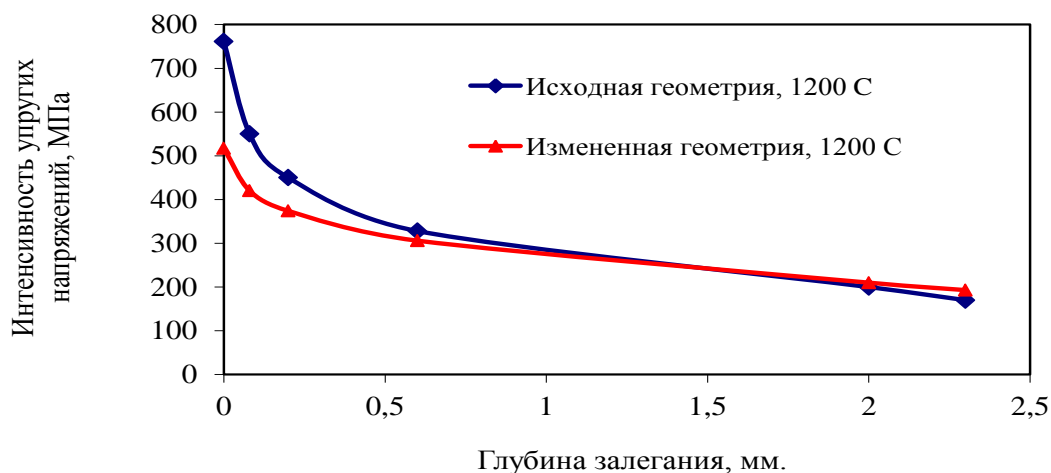


Рисунок 4. Интенсивность упругих напряжений и их глубина залегания в наиболее нагретой точке при штамповке третьей заготовки (третий удар) с учетом изменения геометрии

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).

Исследования показали, что температура на поверхности в наиболее нагретой точке уменьшается на 94⁰С, а на глубине практически остается неизменной (увеличение на 5⁰С).

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

В работе исследовано применение нескольких марок стали для изготовления штампов: сталь 5ХНМ и сталь 5Х2НМФ. Физико-механические свойства этих сталей приведены в таблице 1, а теплофизические свойства этих сталей мало отличаются.

Таблица 1. – Физико-механические свойства сталей

Марка стали	Механические свойства			
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	$E(t=20^0C)$, МПа	δ_5 , %
5ХНМ	1570	1420	201490	9
5Х2НМФ	1750	1500	228570	10

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° и

более) снижает температуру в наиболее напряженных зонах гравюры и до 60% интенсивность внутренних напряжений в поверхностных слоях.

Разработанная методика позволяет не только спрогнозировать выбор марки штамповых сталей с целью повышения стойкости инструмента, но и учесть такие механические свойства, как предел текучести, прочность, усталость, относительное удлинение при разрушении и др.

Для производства штамповой оснастки при изготовлении лап буровых долот создана сквозной технологии проектирования и изготовления штампов с применением CAD, CAM и CAE технологий (рис.5).

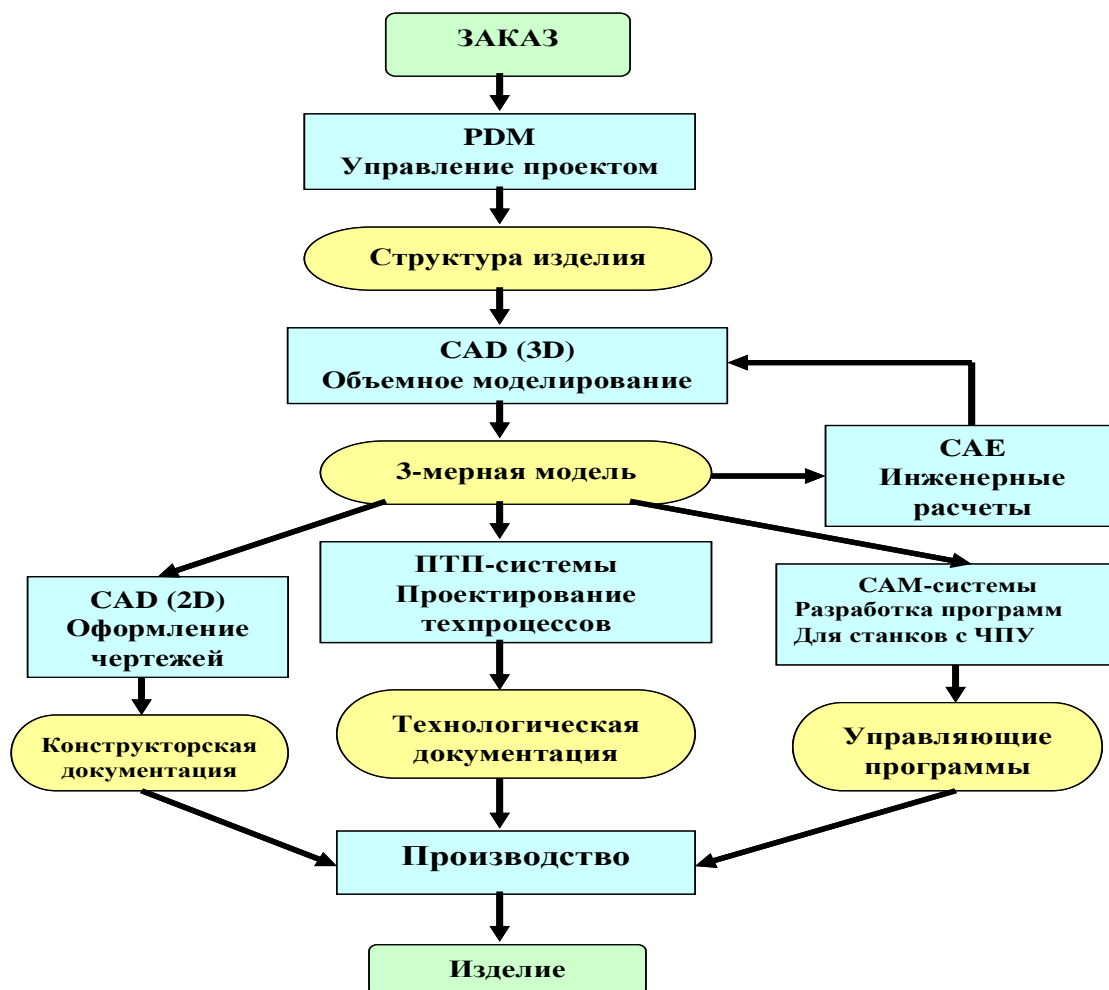


Рисунок 5. Схема процесса сквозного проектирования и изготовления изделия (CAD/CAM/CAE – технологии)

Выводы.

Произведенные исследования процесса штамповки позволили разработать схему сквозного автоматизированного проектирования поковки и штамповой оснастки для ее изготовления, проектирования технологии изготовления штампов, отслеживания и необходимой модификации хода выполнения проектных процедур на всех его стадиях.

Предложено программное обеспечение для 2D- и 3D-моделирования, проектирования технологических процессов и инженерных расчетов, разработана методика и

программный комплекс для построения 3D-моделей заготовки и штампа, созданы системы автоматизированного проектирования «САПР-Долото» [5].

Концепция сквозного цикла еще на стадии проектирования обеспечивает возможность оптимизации геометрических параметров поковки и штампа на основе применения метода конечных элементов в процессе проектирования. После выбора оптимальной геометрии штампа выполняется разработка управляющих программ станков с ЧПУ для его изготовления. Возможности программного обеспечения CAD/CAM являются ключевыми в обеспечении эффективной высокопроизводительной обработки штампов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана технология проектирования сложных штампов с гарантированными прочностными параметрами на основе моделирования процесса их эксплуатации и применения теории приспособляемости.
2. Предложена методика конечно-элементного моделирования процесса штамповки, установлены параметры нагрева заготовки, геометрическая форма гравюры в зависимости от механических свойств материала.
3. Показано, что применение стали 5Х2НМФ существенно (на 90° и более) снижает температуру в наиболее напряженных зонах гравюры и до 60% интенсивность внутренних напряжений в поверхностных слоях.
4. Разработана автоматизированная система сквозного проектирования технологической подготовки производства от заготовок лап буровых долот, до оптимизации геометрии штампов с учетом силовых и температурных режимов эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иванов, Д. В. Введение в Ansys Workbench: Учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. / Д.В. Иванов, А. В. Доль – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с.: ил.
2. Носов, Н. В. Компьютерное моделирование и автоматизация технологических процессов в машиностроении: Уч. пособие / Н. В. Носов, Б. Д. Бондин, Р. М. Лысак, А. А. Черепашков. – Самара: Сам. Гос. Техн. Ун-т, 2008. – 91 с.
3. Cai, s. Modeling of material damping properties in ANSYS /C. Cai, h. Zheng, m. S. Khan and k. C. Hung // cadfem users meeting & ANSYS conference, 2002. 356p.
4. Исследование напряженно-деформированного состояния при запрессовке твердосплавных элементов вооружения шарошки бурового долота / В. И. Кремлёв, Н. В. Носов, Р. М. Богомолов, Л. В. Морозов // Вестн. СамГТУ. Серия «Технич. науки». – Самара, 2005. – Вып. 39. – С. 234-238.
5. Носов, Н. В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / Н. В. Носов, А. А. Черепашков. – СПб.: Проспект науки, 2018. – 592 с.

Поступила в редколлегию 15.02.2022 г.